

شبیه‌سازی و بررسی آزمایشگاهی پنل‌های مدرن چند لایه فلزی - رشته‌ای و بکارگیری آن در بدنه خودرو به منظور کاهش وزن خودرو

صادق رحمتی^۱، حمیدرضا خلیلی^۲
Hkhalili1999@gmail.com

پذیرش مقاله: ۹۰/۰۲/۲۵

دریافت مقاله: ۸۹/۱۲/۰۶

چکیده

بدنه خودرو نقش عمده‌ای در پیشگیری از انتقال انرژی برخورد در تصادفات شدید به سرنشین خودرو ایفا می‌کند. در صورتیکه بتوان انرژی برخورد را در سپر و بدنه خودرو ذخیره نموده یا در محیط آزاد نمود، میزان خسارات وارده به سرنشینان آن به حداقل می‌رسد. استفاده از پنل‌های جدید چند لایه فلزی - رشته‌ای (FML) در بدنه خودرو با توجه به خصوصیات همچون میزان جذب انرژی بسیار بالا، استحکام و مقاومت به فرورفتگی بالا و وزن بسیار سبک موجب کاهش محسوس صدمات تصادف به سرنشین خودرو می‌شود. یکی از برنامه‌های اصلی و کلیدی صنایع خودروسازی جهت کاهش آلاینده‌گی و میزان مصرف سوخت خودروها استفاده از مواد سبک وزن در بدنه خودروها می‌باشد که جدیداً با جایگزین کردن پنل‌های چند لایه سبک وزن با پنل‌های تک لایه فلزی در بدنه خودرو این امر صورت می‌پذیرد. این پنل‌ها معمولاً از دو لایه فلزی نازک در دو طرف پنل و هسته کامپوزیتی در مرکز پنل تشکیل شده‌اند. اولین نکته ای که در پنل‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد، توانایی مقاومت در برابر فرورفتگی است که به Dent Resistance مشهور است. کاهش وزن در پنل‌ها نباید باعث تخریب مقاومت در برابر فرورفتگی پنل گردد. هدف از این مقاله بررسی پنل‌های چند لایه فلزی - رشته‌ای، تحلیل مقاومت به فرورفتگی و میزان جذب انرژی آنها به منظور بکارگیری در بدنه خودرو می‌باشد که با داشتن استحکام و مقاومت به فرورفتگی بالا و وزن بسیار سبک موجب کاهش محسوس صدمات تصادف به سرنشین خودرو شوند.

کلید واژه:

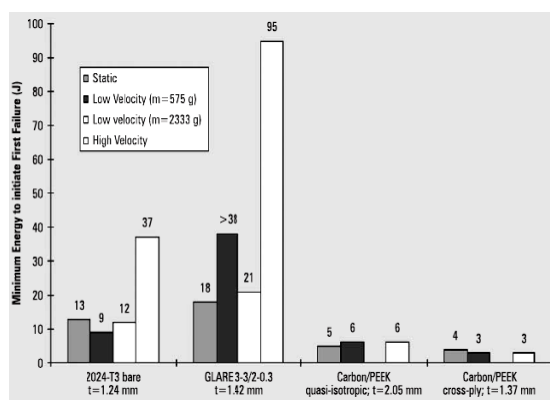
پنل‌های چند لایه فلزی - رشته‌ای - مقاومت به فرورفتگی استاتیکی و دینامیکی - جذب انرژی - کاهش وزن و مصرف سوخت خودرو

۱- دانشیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهر مجلسی، دانشکده مهندسی مکانیک، اصفهان، ایران
۲- کارشناس ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهر مجلسی، دانشکده مهندسی مکانیک، اصفهان، ایران

۱- مقدمه

شده است و در بال هواپیماهای مدرن بکار می‌رود. همچنین آنها مزیت‌های استفاده از پنل FML همچون: مقاومت در مقابل مشتعل شدن، مقاومت در مقابل خوردگی و فرسایش، بهبود رفتار خستگی و کاهش سرعت رشد ترک و مقاومت بالای این پنل‌ها در مقابل فرورفتگی ناشی از ضربه‌های وارد بر بدنه هواپیما را نام بردند. فرورفتگی در بدنه هواپیما می‌تواند ناشی از برخورد سنگ و شن روی باند پرواز، برخورد تگرگ، برخورد پرند به بدنه، برخورد ابزار آلات در حین تعمیر و نگهداری هواپیما و برخورد ذرات از ملخ هواپیما باشد [۵].

Volt [۶] و همکارانش به بررسی مقاومت به ضربه مواد کامپوزیتی، آلومینیومی و FML نسبت به چهار سرعت ضربه متفاوت پرداختند و به خاصیت مقاومت به ضربه بالای FML ها پی برد. نتایج وی در شکل (۱) آورده شده است.



شکل (۱): مقایسه مقاومت به ضربه مواد کامپوزیتی، آلومینیومی و FML [۴]

در این نمودار کمترین انرژی مورد نیاز جهت ایجاد فرورفتگی در مواد فوق‌الذکر با هم مقایسه شده است. با دقت در این نمودار مشاهده می‌شود که GLARE بیشترین مقاومت به ضربه را از خود نشان می‌دهد که مربوط به استحکام بالای Glass/Epoxy در ساختار آن می‌باشد. البته تراکم لایه ها پس از تست فشار موجب کاهش استحکام پنل برای هر دو نمونه GLARE و آلومینیوم ساده می‌شود با وجود اینکه هیچگونه جدایش لایه‌ها و ایجاد ترک در نمونه GLARE مشاهده نشد.

Alderliesten و همکارانش [۷] کاربرد آلیاژهای منیزیم در پنل‌های FML را بررسی کردند و یک ارزشیابی ابتدایی روی پنل FML بر پایه آلیاژ منیزیم انجام دادند. مزیت‌های استفاده از آلیاژ منیزیم شامل چگالی پایین منیزیم و مقاومت به خوردگی و فرسایش بسیار بالا و قابلیت استحفاظ از امواج الکترومغناطیسی می‌باشد که در این مقاله

Abdullah و Cantwell [۱] مقاومت در مقابل ضربه پنل‌های چند لایه فلزی - رشته‌ای را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که این پنل‌های ساندویچی برای بکارگیری در سازه‌هایی که نیاز به جذب انرژی بالا و کاهش وزن محسوس دارند بسیار مناسب هستند. همچنین آنها با تغییر ضخامت هسته کامپوزیتی و لایه خارجی فلزی از جنس آلومینیوم دریافتند که بیشترین انرژی مورد نیاز برای ایجاد فرورفتگی و شکست در پنل‌های به وجود می‌آید که ضخامت هسته کامپوزیتی پنل ماکزیمم و ضخامت لایه فلزی پنل منیمم باشد. آنها انرژی مورد نیاز برای ایجاد فرورفتگی تا آستانه شکست را از رابطه (۱) بدست آوردند.

$$E_p = \frac{\pi D^2 T}{4} \left[1 + \Gamma \sqrt{\frac{\rho}{\delta \epsilon}} v_b \right] \delta \epsilon \quad (1)$$

که در این رابطه:

E_p : انرژی فرورفتگی تا آستانه شکست پنل.

T : ضخامت پنل.

D : قطر پرتابه.

ρ : چگالی پنل.

$\delta \epsilon$: حد تراکم الاستیک.

v_b : سرعت فرورفتن گلوله در پنل است.

Cantwell و Carrill [۲] در تحقیقی به بررسی خواص مکانیکی پنل FML با هسته کامپوزیتی Poly Propylene و آلیاژ آلومینیوم 2024 پرداختند. آنها در تست ضربه، پنل FML به ابعاد ۷۵×۷۵ میلیمتر و قطر ۱/۷۷ میلیمتر را توسط یک گلوله نیم کروی به قطر ۵ میلیمتر که به جرم‌های قابل تغییر ۰/۳۵، ۰/۴۶، ۰/۵۴، ۰/۶ و ۰/۶ کیلوگرم متصل می‌شود، مورد اصابت قرار دادند و با انجام آزمایش‌های متعدد به این نتیجه رسیدند که زاویه Fiber کامپوزیت در هسته FML نقش اندکی در خواص مکانیکی آن دارد. همچنین در تست ضربه، پنل جذب انرژی بسیار بالایی از خود نشان داد و رابطه مستقیمی بین انرژی ضربه و افزایش فرورفتگی تا رسیدن به حالت شکست در پنل مشاهده شد.

Vogelgesan و Vlot [۳-۴] در تحقیق جامعی به کاربرد پنل‌های FML در سازه‌های مدرن هوا فضا پرداختند. آنها دو نوع پنل FML را با نام GLARE و ARALL معرفی کردند. GLARE از هسته کامپوزیتی Glass/Epoxy و لایه‌های خارجی آلومینیومی تشکیل شده و در بدنه هواپیماهای مدرن بکار می‌رود. ARALL از هسته کامپوزیتی Aramid/Epoxy و لایه‌های خارجی آلومینیوم تشکیل

انرژی ضربه عمق فرورفتگی در پنل افزایش می‌یابد و پس از اعمال ضربه آسیب وارد شده در هسته پنل اتفاق می‌افتد که موجب کاهش استحکام پنل می‌شود و این آسیب با چشم قابل رویت نیست.

Guocai و همکارانش [۱۱] در تحقیقی که بر روی پنل‌های کامپوزیتی با پایه فلز انجام دادند، خواص ضربه پذیری و مقاومت در مقابل فرورفتگی ۳ نوع پنل را بررسی کردند. این سه نوع پنل عبارت بودند از:

(۱) پنل ۳ لایه (GLARE 2/1) که از دو لایه آلایژ آلومینیوم (2024-T3) به ضخامت ۰/۴۸۹ میلی‌متر و یک لایه کامپوزیت Glass/Epoxy به ضخامت ۰/۵۸۴ میلی‌متر در وسط تشکیل می‌شد که ضخامت کل ورق ۱/۵۶۲ میلی‌متر می‌باشد.

(۲) پنل (GLARE 3/2) که از ۳ لایه آلایژ آلومینیوم (2024-T3) به ضخامت ۰/۳۰۴ میلی‌متر و دو لایه کامپوزیت Glass/Epoxy به ضخامت ۰/۴۵۸ میلی‌متر در وسط تشکیل می‌شد که ضخامت کل ورق برابر ۱/۸۲۸ میلی‌متر می‌باشد.

(۳) ورق ساده آلایژ آلومینیوم (2024-T3) به ضخامت ۱/۶ میلی‌متر. آنها پس از تست ضربه دینامیکی به این نتیجه رسیدند که میزان انرژی مورد نیاز جهت ایجاد فرورفتگی دینامیکی برای پنل‌های چند لایه بیشتر از پنل تک‌لایه آلومینیومی است. همچنین ورق ۵ لایه نسبت به ورق ۳ لایه حدود ۵ ژول انرژی بیشتر برای ایجاد فرورفتگی صرف می‌کند. همچنین در مقایسه میزان عمق فرورفتگی ماندگار در پنل‌ها به این نتیجه رسیدند که با اعمال انرژی ضربه معادل ۲۵ ژول، پنل ۵ لایه (GLARE 3/2) کمترین فرورفتگی را نشان می‌دهد. در کل نتیجه‌ای که آنها ارائه کردند مبنی بر آن است که هر دو پنل کامپوزیتی با پایه فلز خواص ضربه پذیری بهتری از نظر انرژی مخصوص، میزان آسیب و عمق فرورفتگی ماندگار نسبت به ورق تک لایه آلومینیومی نشان می‌دهند.

Asnafi و همکارانش [۱۲] از اولین کسانی بودند که استفاده از ورق‌های چند لایه فلز - کامپوزیت - فلز (MCM) را در صنعت خودرو با مزیت کاهش وزن محسوس پیشنهاد دادند. آنها یک پنل سه لایه فلز - کامپوزیت - فلز که ضخامت لایه‌های فلز ۰/۲ میلی‌متر و از جنس فولاد و ضخامت لایه کامپوزیت حدود ۰/۶ میلی‌متر و از جنس Glass/Epoxy بود را با ورق‌های یک لایه آلومینیوم به ضخامت ۱ میلی‌متر، فولاد کربنی به ضخامت ۰/۸ میلی‌متر و فولاد زنگ نزن به ضخامت ۰/۸ میلی‌متر مقایسه کردند و به خواص قابل قبول پنل MCM از جمله مقاومت به فرورفتگی و ضربه‌پذیری، پی بردند. در مقایسه این پنل‌ها اگر چه سختی پنل MCM اندکی کمتر از پنل آلومینیومی بود ولی این پنل خواص مقاومت به فرورفتگی و ضربه پذیری بهتری نسبت به سه پنل دیگر از خود نشان داد.

به آنها پرداخته شده است. در ساختارهایی که در معرض خستگی و ایجاد ترک هستند استفاده از منیزیم در پنل FML امکان‌پذیر نمی‌باشد به عنوان مثال پنل بالای بال هواپیما یکی از ساختارهایی است که در معرض این آسیب قرار دارد و در این مقاله به آن اشاره شده است. آنها همچنین بیان کردند که در قسمت‌هایی از سازه که در شرایط بار کم‌انرژی قرار دارد برای استحکام سازه از پنل‌هایی با ضخامت و وزن بالا استفاده می‌شود. اگر در این قسمت‌ها از FML بر پایه منیزیم استفاده شود چون افزایش ضخامت منیزیم نسبت به آلومینیوم افزایش وزن کمتری در پی دارد، می‌توان با این روش خواص تحمل بار کم‌انرژی را در پنل افزایش داد.

Foo [۸] با بررسی پنل ساندویچی از جنس آلومینیوم در تست ضربه با سرعت پایین که توسط یک پرتابه فولادی نیم‌کروی به قطر ۱۳/۱ میلی‌متر انجام شد، انرژی ضربه متفاوتی از ۳-۸۵ ژول که با تغییر ارتفاع سقوط پرتابه بدست می‌آمد به پنل وارد نمود و به این نتیجه رسید که میزان جذب انرژی توسط پنل ارتباط مستقیم با چگالی هسته پنل ساندویچی دارد بطوریکه با رسیدن چگالی هسته پنل به ۸۰ کیلو گرم بر متر مکعب میزان جذب انرژی ضربه به بالاترین میزان خود یعنی ۸۵ درصد رسید.

Liaw و Liv [۹] تست عملی مقاومت به فرورفتگی دینامیکی را بر روی پنل کامپوزیتی با پایه فلز (FML) توسط پرتابه‌های مختلفی انجام دادند. آنها از دو نوع پنل به نام GLARE2 و GLARE3 در تست‌های خود استفاده کردند که تنها تفاوت این دو نوع پنل در نوع کامپوزیت بکار رفته در هسته آنها بود. GLARE2 از کامپوزیت با جهت الیاف Unidirectional (0°) و GLARE3 از کامپوزیت با جهت الیاف Cross-ply (0°/90°) تشکیل شده بود. آنها پس از انجام تست نتایج زیر را ارائه دادند. مقاومت به ضربه در GLARE3 بیشتر از GLARE2 می‌باشد. اولین آسیب در پنل FML در لایه‌ای اتفاق می‌افتد که در معرض ضربه قرار نمی‌گیرد یا به گفته دیگر در طرفی از پنل اولین آسیب دیده می‌شود که با پرتابه اصابت نمی‌کند. پرتابه کوچکتر موجب ایجاد آسیب موضعی بیشتر می‌شود و بزرگتر شدن پرتابه‌ها موجب تغییر شکل خمشی بیشتری می‌شود و ایجاد آسیب و تورق در پنل FML نمی‌کند.

Meo و همکارانش [۱۰] به بررسی پاسخ پنل‌های ساندویچی در مقابل تست ضربه با سرعت پایین پرداختند. آنها با دو روش شبیه‌سازی کامپیوتری و تست عملی این تحقیق را انجام دادند و مقایسه نتایج عملی و شبیه‌سازی حدود ۲/۶ درصد خطا را نشان می‌داد که قابل قبول بود. آنها انرژی ضربه ۲۰-۵ ژول را توسط ماشین تست ضربه به پنل وارد نمودند و دریافتند که با افزایش



شکل (۳): خودروی ساخته شده توسط پنل Hylite با مزیت ۶۵٪ کاهش وزن بدنه

ضخامت پنل Hylite، ۱/۲ میلیمتر می باشد که از دو لایه خارجی آلومینیم به ضخامت ۰/۲ میلیمتر و هسته ۰/۸ میلیمتری پلی پروپیلن تشکیل شده است. این مرکز برای تأیید کیفیت این پنل تست های زیر را انجام داده است:

- مقاومت به فرورفتگی استاتیکی و دینامیکی
- سختی پنل
- کنترل کیفیت سطح پنل
- قابلیت تعمیر و نگهداری
- قابلیت کاهش ارتعاش، لرزش و صدا
- میزان فرسایش و خوردگی

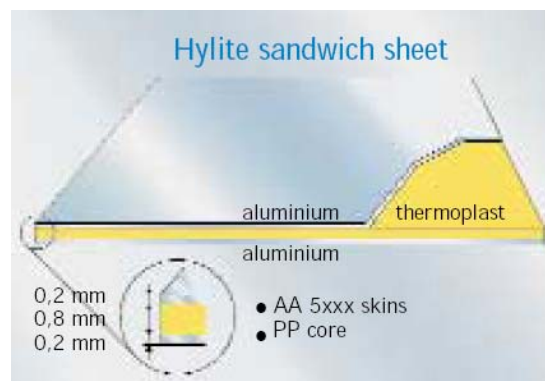
با انجام این تست ها قابلیت های ارزشمند پنل Hylite و مزیت های بکارگیری آن در پنل خودرو مشخص شد. در سال ۱۹۹۰ با ظهور مطالعات گسترده بر روی بحث مقاومت به فرورفتگی نیاز به ایجاد روش های استاندارد انجام تست به چشم می آمد. در سال ۱۹۹۷ شرکت Auto steel [۱۴] روش تست استاندارد برای هر دو نوع فرورفتگی استاتیکی و دینامیکی منتشر کرد. این استانداردها شامل راهنمایی نکات اصلی جهت انجام تست های فرورفتگی می باشند که بعضی از این نکات عبارتند از:

- تعیین نوع نسبه
- روش های اعمال بار استاتیکی و دینامیکی
- سرعت نسبه برای فرورفتگی دینامیکی
- کنترل عمق فرورفتگی

پس از آن بیشتر تست های فرورفتگی استاتیکی و دینامیکی انجام شده از این استاندارد تبعیت نمودند. برای تست مقاومت به فرورفتگی دینامیکی پرتابه کرومی فولادی به قطر ۲۵/۴ mm توصیه می شود. همچنین در این استاندارد میزان عمق فرورفتگی قابل رویت حدود ۰/۱ mm گزارش شده است که در مقالات مختلفی این میزان عمق فرورفتگی مدنظر قرار گرفته است. پروسه تست فرورفتگی دینامیکی شامل یک پرتابه است که از ارتفاع سقوط معینی بر روی پنل رها می شود. این تست براساس انرژی ضربه وارده بر پنل طرح ریزی شده است که میزان این انرژی ۰/۲ تا ۰/۵ ژول می باشد.

از مزیت های دیگر پنل MCM کاهش ۶۰٪ وزن در مقایسه با ورق های فولادی است.

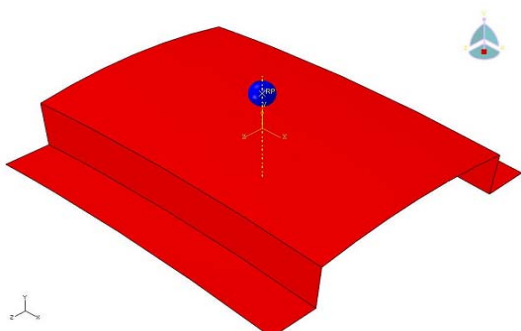
تست ضربه دینامیکی (DIT) Dynamic Impact Test در مرکز تحقیقات Corus (واحد توسعه و تکنولوژی کاربردی خودرو) توسعه یافت [۱۳]. تست ضربه مکانیکی برای اندازه گیری مقاومت به فرورفتگی (Dent Resistance) پنل های خارجی بدنه خودرو در برابر اجسامی که با سرعت زیاد به سمت پنل خودرو پرتاب می شوند بکار می رود. مرکز تحقیقات Corus اثر نوع و خواص ماده شامل (فولاد، آلومینیم، مواد مرکب و ساندویچی) و تاثیر ضخامت و هندسه محصول نهایی بر مقاومت به فرورفتگی آن را بررسی می کند که این تحقیقات اطلاعات مفیدی به خودروسازان برای انتخاب نوع ماده به کار رفته در بدنه خودرو ارائه می دهد به عنوان مثال این مرکز با انجام تحقیقاتی بر روی تاثیر ضخامت و تنش تسلیم پنل بر مقاومت به فرورفتگی آن انجام داد به این نتیجه رسید که با افزایش ضخامت و تنش تسلیم پنل میزان عمق فرورفتگی کاهش و مقاومت به فرورفتگی افزایش می یابد. همچنین نتایج عملی تست ضربه دینامیکی برای صحت گذاری، تأیید اعتبار و توسعه مدل های شبیه سازی اجزاء محدود برای پیشگویی مقاومت به فرورفتگی دینامیکی پنل خودرو بکار می رود. پروژه اخیر مرکز تحقیقات Corus طراحی و ساخت ورق های ساندویچی سبک سه لایه از جنس آلومینیم- پلی پروپیلن (Al/Polypropylene/Al) می باشد که این پنل با نام تجاری Hylite به ثبت رسیده است و در شکل (۲) نمونه ای از این پنل آورده شده است.



شکل (۲): پنل خودرو با نام تجاری Hylite ساخته شده در مرکز corus

به گفته این مرکز ساخت پنل های خودرو با این پنل علاوه بر داشتن مقاومت و استحکام کافی موجب کاهش محسوس وزن می شود بطوریکه در مقایسه با فولاد موجب ۶۵٪ کاهش وزن و در مقایسه با آلومینیم ۳۰٪ موجب کاهش وزن می شود. در شکل (۳) خودروی ساخته شده از پنل Hylite آورده شده است.

شبهه‌سازی‌های مختلف بهینه‌ترین پنل از دیدگاه بیشترین مقاومت به فرورفتگی دینامیکی و کمترین وزن انتخاب شد. اندازه و شکل پنل در این مقاله مطابق با اندازه پنل استاندارد بکار رفته که در شکل (۵) مدل‌سازی سه بعدی آن را در نرم‌افزار ABAQUS مشاهده می‌کنیم.



شکل (۵): شکل سه بعدی پنل و پرتابه در ABAQUS

همانطور که گفته شد برای بررسی تاثیر جنس ماده بر میزان مقاومت به فرو رفتگی دینامیکی در ساختار ورق سه لایه از سه جنس فولاد، آلومینیوم و منیزیم برای لایه فلزی و برای لایه کامپوزیت با توجه به استحکام بالای کامپوزیت از نوع Glass/Epoxy، از این ماده استفاده شد. که در ادامه خواص مکانیکی و الاستیک-پلاستیک آنها آورده شده است.

جدول (۱): خواص الاستیک سه فلز فولاد، آلومینیوم و منیزیم

Material	E (Pa)	ν	S_y (MPa)	ρ (Kg/m ³)
Steel	2.1e+11	0.28	190	7800
Aluminium	7e+10	0.33	193	2700
Magnesium	4.5e+10	0.35	180	1790

جدول (۲): خواص پلاستیک سه فلز فولاد، آلومینیوم و منیزیم

Steel		Aluminium		Magnesium	
Strain	Stress	Strain	Stress (Mpa)	Strain	Stress (Mpa)
0	240	0	112	0	117
0.04	300	0.002	130	0.0203	140
0.06	325	0.004	140	0.0381	150
0.08	342	0.006	148	0.0635	159
0.14	385	0.01	160	0.0889	166
0.19	405	0.016	170	0.1193	170
0.25	430	-	-	-	-
0.31	445	-	-	-	-

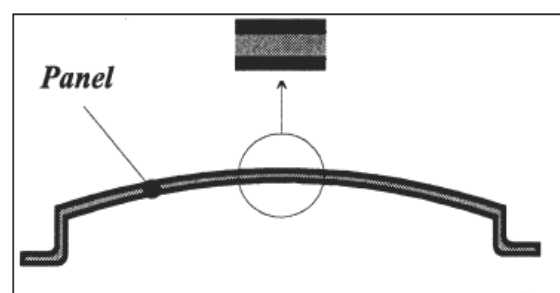
خواص الاستیک کامپوزیت Glass/Epoxy در جدول (۴) آورده شده است که چگالی آن $2000 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$ می‌باشد.

۲- سبک سازی خودرو

با توجه به سیاست‌گذاری جدید کشورهای توسعه یافته به منظور کاهش مصرف سوخت و به دنبال آن کاهش وزن خودرو تحقیق در زمینه سازه‌های ساندویچی سبک وزن بسیار مورد توجه کمپانی‌های خودروسازی واقع شده است یکی از برنامه‌های اصلی و کلیدی آنها جهت دسترسی به میزان مصرف سوخت هدف‌گذاری شده (۳ لیتر در ۱۰۰ کیلومتر)، استفاده و توسعه کاربرد مواد سبک وزن در خودروها می‌باشد. برای دسترسی به خودروهایی با این میزان مصرف سوخت علاوه بر فعالیت‌هایی که در بهینه‌سازی موتور و طراحی و همچنین کاهش اتلاف انرژی انجام می‌شود، وزن کل خودرو نیز بایستی حدوداً ۴۰ درصد کاهش یابد تا دسترسی به هدف تعیین شده امکان‌پذیر گردد.

۳- کار جاری

با توجه به تحقیقات انجام شده بر روی پنل‌های چندلایه و مقاومت به فرورفتگی دینامیکی در این مقاله یک پنل سه لایه فلز-کامپوزیت-فلز که شماتیک آنرا در شکل (۴) می‌بینیم با توجه به تست استاندارد مقاومت به فرو رفتگی دینامیکی SAE J2575 [۱۵] که در آن یک گلوله فولادی به قطر $25/4$ میلیمتر از ارتفاع ۹۱۴ میلیمتر بر روی پنل خودرو رها می‌شود مورد شبهه‌سازی توسط نرم‌افزار ABAQUS قرار می‌گیرد و تاثیر پارامترهای ضخامت لایه‌ها و جنس فلز بر میزان مقاومت به فرو رفتگی دینامیکی بررسی می‌شود.



شکل (۴): شماتیک پنل خودرو برای انجام شبهه سازی

ضخامت و جنس لایه‌ها برای بهبود مقاومت به فرورفتگی پنل و کاهش وزن با توجه به مطالعات انجام شده به صورت زیر در نظر گرفته شد. ضخامت لایه فلز در بالا و پایین پنل بین $0/2$ و $0/3$ میلیمتر و ضخامت لایه کامپوزیت مرکزی بین $0/3$ تا $0/8$ میلیمتر در نظر گرفته شد و لایه‌های فلز از جنس فولاد، آلومینیوم و منیزیم و جنس لایه کامپوزیتی از نوع Glass/Epoxy می‌باشد که با انجام

شبیه سازی و حل توسط نرم افزار میزان فرورفتگی دینامیکی هر پنل و وزن آن محاسبه می شود که در جدول ۶ میزان فرو رفتگی پلاستیک در هر پنل با توجه به شماره تست آورده شده است. با انجام تست مقاومت به فرو رفتگی و به دست آوردن بهینه ترین حالت می توان به راهکار جدیدی جهت طراحی پنل بدنه خودرو دست پیدا کرد. شکل (۶) طراحی اولیه دستگاه و نحوه ارتباط المان های مختلف را با هم نمایش می دهد.



شکل (۶): تجهیزات آزمایشگاهی انجام تست مقاومت به فرورفتگی دینامیکی به همراه سنسور متصل به کامپیوتر

برای انجام تست مقاومت به فرورفتگی دینامیکی طبق استاندارد، به گلوله ی فولادی به قطر ۲۵/۴ میلیمتر و تجهیزات پرتاب گلوله از ارتفاع ۱۲۰۰ میلیمتر بر روی پنل و همچنین جیگ و فیکسچر برای ثابت کردن پنل و سنسور نیاز است که سنسور شتاب سنج این دستگاه در مرکز پنل و دقیقاً در زیر نقطه ای که مورد اصابت پرتابه قرار می گیرد نصب می شود و این سنسور توسط کابل رابط به کامپیوتر وصل می شود که در شکل (۷) پنل های بکار رفته در این مقاله آورده شده است. سنسور به کمک نرم افزاری که توسط شرکت سازنده طراحی شده است نمودار شتاب وارد بر پنل بر حسب زمان را رسم می نماید که در شکل (۸) یک نمونه از این نمودار را می بینیم و با توجه به اینکه در این تحقیق میزان جابجایی یا خیز پنل مورد توجه است می توان با دو بار انتگرال گیری از داده های شتاب بر حسب زمان، نمودار جابجایی مرکز پنل را رسم نمود و با

۴- بازه ضخامت لایه ها در پنل ساندویچی

ضخامت لایه فلز در بالا و پایین پنل بین ۰/۲ تا ۰/۳ میلیمتر و ضخامت لایه کامپوزیت مرکزی بین ۰/۳ تا ۰/۸ میلیمتر در نظر گرفته می شود که با انجام شبیه سازی های مختلف که در جدول (۴) آورده شده است بهینه ترین پنل از دیدگاه بیشترین مقاومت به فرورفتگی دینامیکی و کمترین وزن انتخاب می شود.

جدول (۳): خواص الاستیک کامپوزیت Glass/Epoxy

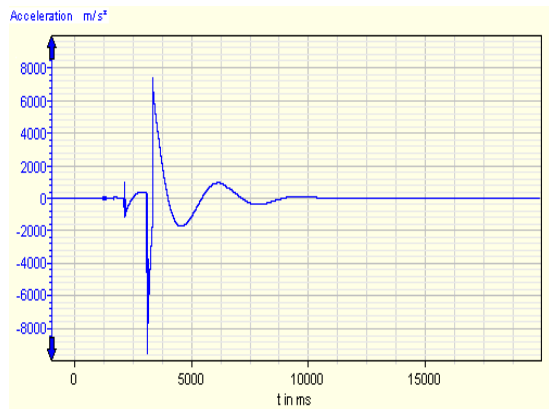
E1	5.5e+10
E2	9.5e+09
ν_{12}	0.33
G12	5.5e+09
G13	3e+09
G23	3e+09

جدول (۴): بازه ضخامت فلز و کامپوزیت در پنل ۳ لایه

Test Number	Metal Thickness (mm)	Composite Thickness (mm)	Material
1	0.2	0.3	St
2	0.2	0.55	Al
3	0.3	0.8	Mg
4	0.25	0.55	Mg
5	0.2	0.8	St
6	0.3	0.3	Mg
7	0.3	0.3	Al
8	0.25	0.3	Mg
9	0.3	0.8	St
10	0.25	0.8	Al
11	0.25	0.3	Al
12	0.3	0.55	Al
13	0.25	0.425	St
14	0.3	0.3	St
15	0.2	0.3	Al
16	0.2	0.8	Mg
17	0.2	0.3	Mg

۵- روش انجام تست

با توجه به تست استاندارد مقاومت به فرو رفتگی دینامیکی SAE J2575 یک گلوله فولادی به قطر ۲۵/۴ میلیمتر از ارتفاع ۱۲۰۰ میلیمتر بر روی پنل مدلسازی شده رها می شود. جرم این پرتابه ۰/۰۶۶ کیلوگرم می باشد که این شبیه سازی توسط نرم افزار ABAQUS انجام می شود. در این نرم افزار مسائل برخورد دارای مرحله دینامیک هستند که نوع انتگرال گیری آن Explicit می باشد و یک step با زمان ۳۰ میلی ثانیه انتخاب می شود. پس از انجام



شکل (۸): نمودار شتاب بر حسب زمان برای پنل فولادی به ضخامت ۱/۲ mm

جدول (۵): میزان فرورفتگی و وزن پنل در تست‌های انجام شده

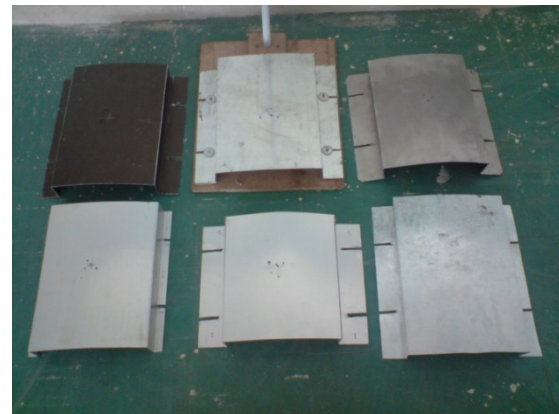
Test Number	Material	Dent Depth(mm)	Mass(gr)
1	St	0.55	572.9
2	Al	0.73	335.7
3	Mg	0.46	411.8
4	Mg	0.371	307.2
5	St	0.67	726.9
6	Mg	0.31	257.8
7	Al	0.6	341.9
8	Mg	0.296	230.2
9	St	0.3	967.1
10	Al	0.78	454.3
11	Al	0.54	300.3
12	Al	0.78	414.8
13	St	0.68	731.5
14	St	0.58	813.1
15	Al	0.58	258.7
16	Mg	0.41	356.6
17	Mg	0.298	202.6

$K \propto Et^3 \Rightarrow E_{st}t_{st}^3 \propto E_{Al}t_{Al}^3, E_{st}t_{st}^3 \propto E_{Mg}t_{Mg}^3$ (۲)
با توجه به فرمول (۲) و قرار دادن مدول الاستیسیته فلزات میزان سختی معادل بصورت زیر بدست می‌آید.

$$t_{Al} = 1.43t_{st} \approx 1mm, \dots, t_{Mg} = 1.67t_{st} \approx 1.17mm$$

برای شبیه‌سازی نمونه با پنل خودرو ضخامت پنل یک لایه فولادی را برابر ۰/۷ میلی‌متر در نظر می‌گیریم چون ضخامت پنل بدنه خودرو از جنس فولاد ۰/۷ میلی‌متر می‌باشد و با توجه به فرمول بالا ضخامت آلومینیوم را برابر ۱ میلی‌متر و ضخامت منیزیم را برابر ۱/۱۷ میلی‌متر در نظر می‌گیریم. همچنین پنل کامپوزیتی از جنس Glass/Epoxy و از سه لایه به ضخامت ۰/۳۵ میلی‌متر با زاویه fibre

نمودار بدست آمده از نرم افزار اجزاء محدود مقایسه کرد و به صحت روش اجزاء محدود پی برد. در ادامه نمودارهای بدست آمده از دستگاه شتاب سنج برای پنل فولادی با ضخامت مختلف آورده شده است.

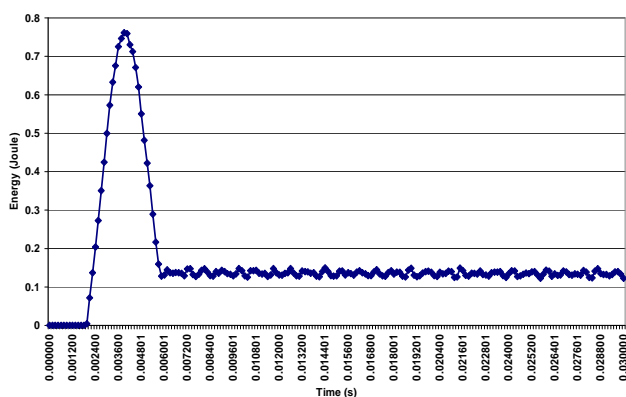


شکل (۷): پنل و فیکسچر پنل به منظور ایجاد تکیه گاه گیردار

در ادامه نتایج شبیه‌سازی و میزان فرورفتگی دینامیکی در پنل‌ها آورده شده است برای مقایسه دو پارامتر مهم میزان فرورفتگی دینامیکی و وزن پنل در حالت‌های مختلف، این دو عامل در جدول (۵) آورده شده‌اند.

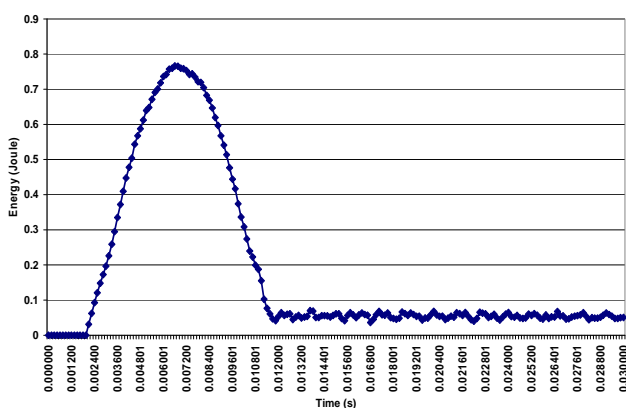
همچنین میزان جذب انرژی ضربه توسط پنل تک لایه فولادی، آلومینیومی، منیزیم و کامپوزیتی و همچنین میزان جذب انرژی توسط پنل چندلایه با ضخامت‌های متفاوت طبق جدول (۵) آورده و با یکدیگر مقایسه شده است. لازم به ذکر است که میزان ضخامت آنها با توجه به سختی معادل در نظر گرفته می‌شود. به گفته دیگر برای سنجش مواد با یکدیگر، ضخامت آنها باید با توجه به سختی تغییر نماید. در ابتدا پنل فولادی با ضخامت ۰/۷ میلی‌متر مدل می‌شود و در مرحله بعد پنل آلومینیومی باید مدلسازی شود که برای سنجش میزان مقاومت به فرورفتگی، ضخامت آلومینیوم باید با توجه به سختی آن تغییر کند. یعنی اینکه ضخامت آلومینیوم بکار رفته در پنل با توجه به خواص مکانیکی آن تصحیح شود تا سختی معادل سختی پنل فولادی از نظر استاتیک داشته باشد. در مسائل برخورد ضخامت آلومینیوم را تقریباً ۲ برابر ضخامت فولاد در نظر می‌گیرند. اما در آنالیزهای دقیق تر ضخامت آلومینیوم ۱/۴ برابر ضخامت فولاد در نظر گرفته شده است که این مقدار از فرمول (۲) بدست می‌آید. همچنین ضخامت پنل تک لایه منیزیمی نیز از سختی معادل محاسبه می‌شود. [۱۶].

زمان برای این پنل به صورت شکل (۱۱) استخراج می شود.



شکل (۱۱): نمودار انرژی جذب شده بر حسب زمان برای پنل منیزیمی به ضخامت ۱/۱۷ mm

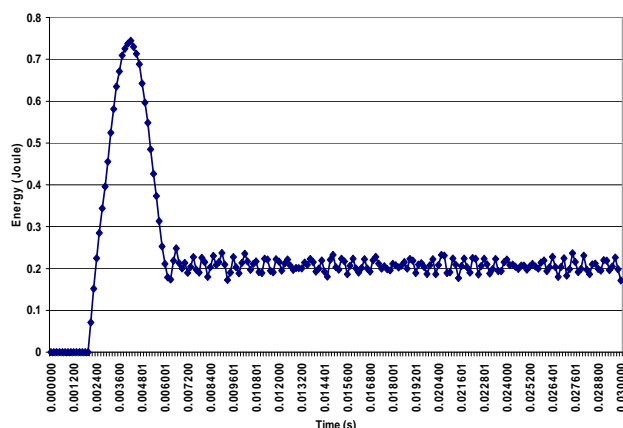
در این شبیه سازی پنل تک لایه کامپوزیتی به ضخامت ۱ میلی متر را در نظر می گیریم، این پنل از جنس Glass/Epoxy و از سه لایه به ضخامت ۰/۳۵ میلی متر با زاویه fibre از بالا به پائین ۰، ۴۵ و ۴۵- درجه تشکیل شده است و طبق استاندارد مقاومت به فرورفتگی دینامیکی مورد تست قرار می گیرد. با انجام آنالیز Explicit، نمودار جذب انرژی ضربه بر حسب زمان برای این پنل به صورت شکل (۱۲) استخراج می شود.



شکل (۱۲): نمودار انرژی جذب شده بر حسب زمان برای پنل کامپوزیتی به ضخامت ۱ mm

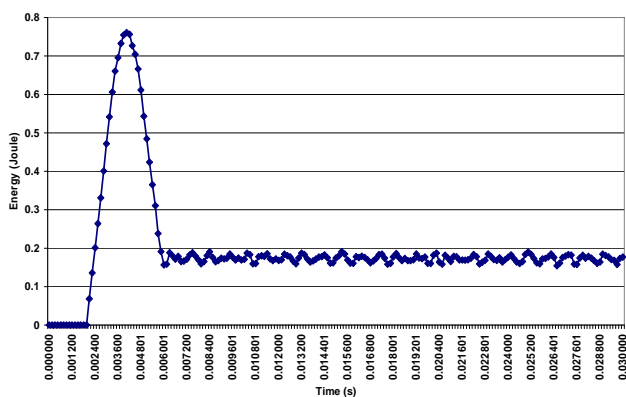
در هنگام برخورد گلوله به پنل میزان تنش وارده موجب ایجاد تغییر شکل الاستیک و پلاستیک در پنل می شود که میزان تنش در تغییر شکل الاستیک و پلاستیک در شکل (۱۳) و (۱۴) آورده شده است.

از بالا به پائین ۰، ۴۵ و ۴۵- درجه تشکیل شده است. در اولین شبیه سازی پنل تک لایه فولادی به قطر ۰/۷ میلی متر که در پنل بدنه خودرو بکار می رود مدل شده و طبق استاندارد مقاومت به فرورفتگی دینامیکی مورد تست قرار می گیرد. با انجام آنالیز Explicit در بازه زمانی ۰/۰۳ ثانیه نمودار جذب انرژی ضربه بر حسب زمان برای این پنل به صورت شکل (۹) استخراج می شود.



شکل (۹): نمودار انرژی جذب شده بر حسب زمان برای پنل فولادی به ضخامت ۰/۷mm

در شبیه سازی بعدی پنل تک لایه آلومینیومی به قطر ۱ میلی متر مدل می شود و نمودار جذب انرژی ضربه بر حسب زمان برای این پنل به صورت شکل (۱۰) استخراج می شود.

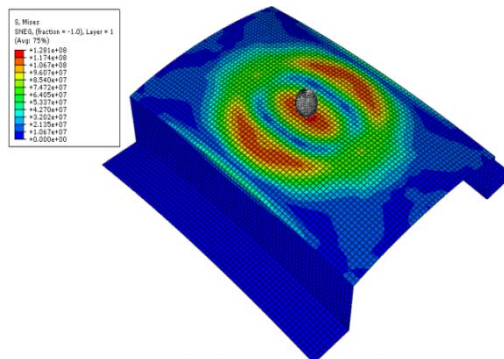


شکل (۱۰): نمودار انرژی جذب شده بر حسب زمان برای پنل آلومینیومی به ضخامت ۱mm

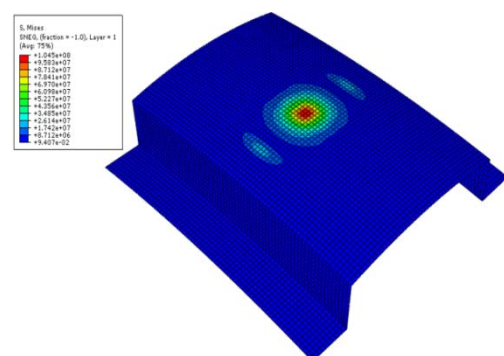
در ادامه پنل تک لایه منیزیمی به ضخامت ۱/۱۷ میلی متر مدل شده و طبق استاندارد مقاومت به فرورفتگی دینامیکی مورد تست قرار می گیرد. با انجام آنالیز Explicit، نمودار جذب انرژی ضربه بر حسب

جدول (۶): میزان ضخامت لایه‌ها و جرم کل پنل

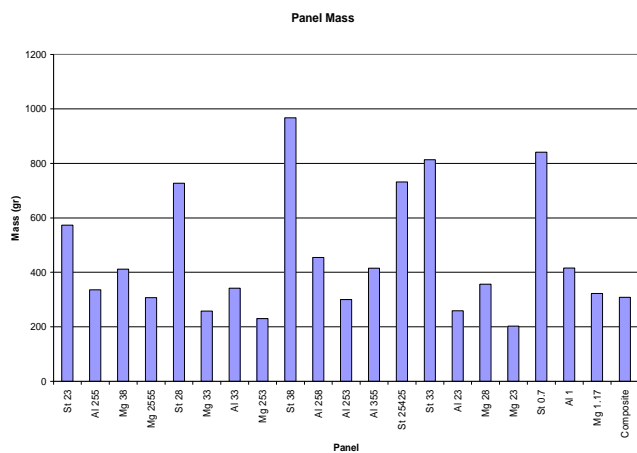
Test Number	Matel Thick(mm)	Composite Thick (mm)	Mass (gr)
1	St (0.2)	0.3	572.9
2	Al (0.2)	0.55	335.7
3	Mg (0.3)	0.8	411.8
4	Mg (0.25)	0.55	307.2
5	St (0.2)	0.8	726.9
6	Mg (0.3)	0.3	257.8
7	Al (0.3)	0.3	341.9
8	Mg (0.25)	0.3	230.2
9	St (0.3)	0.8	967.1
10	Al (0.25)	0.8	454.3
11	Al (0.25)	0.3	300.3
12	Al (0.3)	0.55	414.8
13	St (0.25)	0.425	731.5
14	St (0.3)	0.3	813.1
15	Al (0.2)	0.3	258.7
16	Mg (0.2)	0.8	356.6
17	Mg (0.2)	0.3	202.6
18	St (0.7)	-	840.8
19	Al (1)	-	415.8
20	Mg (1.17)	-	322.5
21	-	Composite (1)	308



شکل (۱۳): کانتور تنش Von-Mises در لحظه جدایش گلوله از پنل در آنالیز Explicit تغییر شکل الاستیک



شکل (۱۴): کانتور تنش Von-Mises در آنالیز Implicit تغییر شکل پلاستیک



شکل (۱۵): نمودار مقایسه جرم پنل‌های مختلف

همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین جذب انرژی مربوط به پنل St 28 با ترکیب فولاد می‌باشد که در این پنل ضخامت فولاد ۰/۲ میلی‌متر و ضخامت کامپوزیت ۰/۸ میلی‌متر است همچنین کمترین جذب انرژی در پنل یکپارچه کامپوزیتی به علت عدم تغییر شکل پلاستیک رخ می‌دهد زیرا میزان جذب انرژی رابطه مستقیم با مقدار تغییر شکل پلاستیک پنل دارد.

پس از انجام تمام شبیه‌سازی‌های گفته شده در ادامه نتایج را با یکدیگر مقایسه می‌کنیم. در مقایسه میزان فرورفتگی دینامیکی کمترین میزان فرورفتگی دینامیکی مربوط به تست شماره ۸ است که ضخامت فلز منیزیم در این پنل ۰/۲۵ میلی‌متر و ضخامت لایه کامپوزیت ۰/۳ میلی‌متر است و همچنین کمترین وزن هم مربوط به پنل ساخته شده از فلز منیزیم می‌باشد که مزیت‌های بکارگیری این فلز در بدنه خودرو را مشخص می‌کند و همانطور که مشاهده می‌کنیم بیشترین وزن مربوط به پنل‌های ساخته شده از فلز فولاد است.

در مقایسه بعدی میزان جرم پنل‌ها با یکدیگر سنجیده می‌شود که بدین منظور میزان جرم پنل‌ها در جدول (۶) ارائه شده و همچنین مقایسه جرم پنل‌ها در شکل (۱۵) آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین جرم مربوط به پنل با ترکیب فولاد می‌باشد که در این پنل ضخامت فولاد ۰/۳ میلی‌متر و ضخامت کامپوزیت ۰/۸ میلی‌متر است.

در مقایسه بعدی میزان جذب انرژی در پنل‌ها با یکدیگر سنجیده می‌شود که بدین منظور میزان جذب انرژی پنل‌ها در جدول (۷) ارائه شده و همچنین مقایسه جذب انرژی پنل‌ها در شکل (۱۶) آورده شده است.

کرنشی داخلی ماده تبدیل می شود. اگر برخورد کاملاً الاستیک باشد تمام انرژی کرنشی به شکل الاستیک بوده و برگشت پذیر می باشد که تقریباً این پدیده در مورد پنل یکپارچه کامپوزیتی مشاهده می شود اما اگر بخشی از پنل به تسلیم برسد قسمتی از انرژی کرنشی به شکل الاستیک و قسمتی دیگر به شکل پلاستیک خواهد بود. بنابراین با گذشت زمان، انرژی جنبشی کل سیستم کاهش یافته و در مقابل انرژی کرنشی افزایش می یابد تا اینکه به ماکزیمم مقدار خود می رسد. این زمان همان نقطه خیز ماکزیمم پنل می باشد که نیروی برخورد نیز در این لحظه ماکزیمم است. بعد از این لحظه، با توجه به اینکه رفته رفته تغییر شکل های الاستیک پنل از بین می رود، انرژی کرنشی سیستم به دلیل بازگشت انرژی کرنشی الاستیک، کاسته می شود. اگر برخورد کاملاً الاستیک باشد انرژی جنبشی بعد از جدایش پرتابه از پنل با انرژی جنبشی اولیه برابر خواهد بود و انرژی کرنشی صفر خواهد شد. اما اگر برخورد همراه با تسلیم باشد، انرژی جنبشی ثانویه کمتر از انرژی جنبشی اولیه سیستم بوده و مقداری انرژی به صورت انرژی کرنشی پلاستیک باقی خواهد ماند و ایجاد فرو رفتگی ماندگار در پنل می کند.

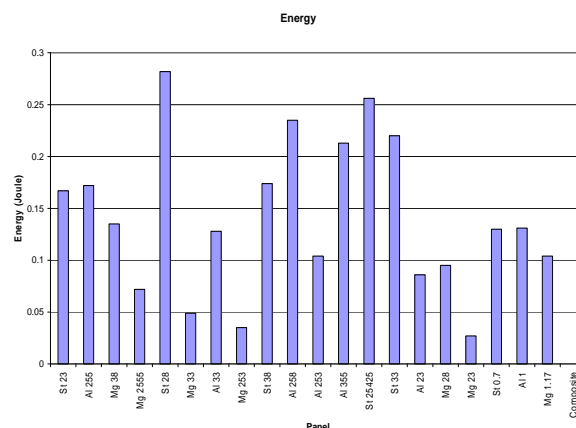
همچنین در مطالعه میزان تاثیر ضخامت بر رفتار پنل در اثر برخورد گلوله، میزان خیز ماکزیمم برای پنل های چند لایه با شرایط و جنس یکسان و ضخامت های متفاوت مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که افزایش ضخامت موجب کاهش خیز ماکزیمم و تنش های وارده به پنل شده ولی نیروی برخورد را افزایش می دهد. با توجه به شبیه سازی های انجام شده در مورد پنل های چند لایه، از نقطه نظر بیشترین مقاومت به فرورفتگی و کمترین وزن استفاده از فلز منیزیم به همراه کامپوزیت Glass/Epoxy بسیار مناسب است. به نظر می رسد که بکارگیری پنل های چند لایه علاوه بر کاهش محسوس وزن مشکلاتی که جایگزین کردن فلزات تک لایه سبک به جای فولاد ایجاد می کرد را مرتفع می کند.

۷- مراجع

- [1] Abdullah, M.R., Cantwell, W.J., "The impact resistance of polypropylene-based fiber-metal laminates". International Journal of Composites Science and Technology, No. 66, pp. 1682-1693, 2006.
- [2] Carrillo, J.G., Cantwell, W.J., "Mechanical properties of a novel fiber-metal laminate based on a polypropylene composite". International Journal of Mechanics of Materials, 2009.
- [3] Vogelesang, L.B., Vlot, A., "Development of fibre metal laminates for advanced aerospace structures". Journal of Materials Processing Technology, No. 103, pp. 1-5, 2000.

جدول (۷): ضخامت لایه ها و میزان جذب انرژی پنل ها

Test Number	Matel Thick(mm)	Composite Thick (mm)	Energy (Joule)
1	St (0.2)	0.3	0.167
2	Al (0.2)	0.55	0.172
3	Mg (0.3)	0.8	0.135
4	Mg (0.25)	0.55	0.072
5	St (0.2)	0.8	0.282
6	Mg (0.3)	0.3	0.049
7	Al (0.3)	0.3	0.128
8	Mg (0.25)	0.3	0.035
9	St (0.3)	0.8	0.174
10	Al (0.25)	0.8	0.235
11	Al (0.25)	0.3	0.104
12	Al (0.3)	0.55	0.213
13	St (0.25)	0.425	0.256
14	St (0.3)	0.3	0.22
15	Al (0.2)	0.3	0.086
16	Mg (0.2)	0.8	0.095
17	Mg (0.2)	0.3	0.027
18	St (0.7)	-	0.13
19	Al (1)	-	0.131
20	Mg (1.17)	-	0.104
21	-	Composite (1)	1.46E-5



شکل (۱۶): نمودار مقایسه جذب انرژی پنل های مختلف

۶- جمع بندی و نتیجه گیری

ماهیت پدیده بار ضربه ای به پنل شامل تبدیل انرژی جنبشی پرتابه به انرژی داخلی ماده می باشد. با دقت در این پدیده در زمان صفر و قبل از برخورد، متوجه می شویم که انرژی جنبشی سیستم ماکزیمم بوده و ناشی از سرعت پرتابه می باشد. با گذشت زمان، در اثر برخورد پرتابه به پنل، رفته رفته از انرژی جنبشی آن کاسته شده و بخشی از آن صرف افزایش انرژی جنبشی پنل شده و مقداری از آن به انرژی

- loading". International Journal of Mechanical Sciences, No. 47, pp. 1301-1325, 2005.
- [11] Guocai, W., Yang, J.M., "The impact properties and damage tolerance and of bi-directionally reinforced fiber metal laminates". J Mater Sci, No. 42, pp. 948-957, 2007.
- [12] Asnafi, N., Langstedt, G., Andersson, C. H., stergren, N. O. and Hakansson, T., "A New Lightweight Metal-Composite-Metal Panel For Applications In The Automotive And Other Industries", Journal of Thin-Walled Structures 36, pp. 289-310, 2000.
- [13] Corus Research, "Dynamic dent test, Development & Technology Automotive Applications", MEP/02-2002.
- [14] Schaeffer, D.J., "Procedures for dent resistance evaluations of automotive outer body panels and assemblies under quasi-static and dynamic indenting conditions". Technical Report 1.0, Auto/Steel Partnership Standardized Dent Resistance Task Force, January 1997.
- [15] "J2575 Standardized Dent Resistance Test Procedure". SAE international, The premier society dedicated to advancing mobility engineering worldwide, www.sae.org.
- [16] Kiasat, M.S., Najibi, A., "Numerical Analysis of Crashworthiness of Circular and Square Tubes under Axial Crashing". ISME2008 May, pp. 14-16, 2008.
- [4] Vogelesang, L.B., Schijve, J., and Fredell, R., "Fibre metal laminates: damage tolerant aerospace materials". in Demaid, A. and de Wit, J.H.W. (Eds), Case Studies in Manufacturing with Advanced Materials, Vol. 2, 1995.
- [5] Vlot, A., "Low velocity impact loading on fibre reinforced aluminium laminates". dissertation, TU Delft, 1991.
- [6] Vlot, A., La Rocca, G., "Impact response of fibre metal laminates". in Kim, J.K. and Yu, T.X. (Eds), Impact Response and Dynamic Failure of Composites and Laminate Materials, Key Engineering Materials, Trans Tech Publ., Switzerland, 1998.
- [7] Alderliesten, R., Benedictus, R., Rans, C., "The applicability of magnesium based Fibre Metal Laminates in aerospace structures". Journal of Composites Science and Technology, No. 68, pp. 2983-2993, 2008.
- [8] Foo, C.C., Seah, L.K., Chai, G.B., "Low-velocity impact failure of aluminium honeycomb sandwich panels". International Journal of Composite Structures, No. 85, pp. 20-28, 2008.
- [9] Liu, Y.X., Liaw, B.M., "Drop- Weight Impact on Fiber-Metal Laminates Using Various Indenters". SEM X International Congress & Exposition on Experimental and Applied Mechanics Costa Mesa, CA, June 7-10, 2004.
- [10] Meo, M., Vignjevic, R., Marengo, G., "The response of honeycombsandwich panels under low-velocity impact