

تحلیل عددی ضربه سرعت بالا بر روی مواد هدفمند گرادایانی

مهدی حیدری میبدی*

۱- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۱)

چکیده

توجه روزافزون صنایع با تکنولوژی بالا (از جمله صنایع هوایی و دفاعی) به مواد هدفمند گرادایانی نشان از کارایی بالای این دسته از مواد در صنایع مختلف دارد. عمده علت این توجه، دارا بودن ویژگی‌های منحصر به فرد این دسته از مواد است. در پژوهش حاضر، ضربه سرعت بالا بر روی ماده هدفمند گرادایانی متشکل از دو آلیاژ فلزی AA5083-H116 و Ti-6Al-4V با احتساب مدل پلاستیک و مدل خرابی جانسون-کوک صورت پذیرفته است. این مطالعه به صورت عددی و با استفاده از کدنویسی پایتون در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس صورت پذیرفته است. از موارد بررسی شده در پژوهش حاضر می‌توان به بررسی اثر شکل دماغه (نوک) ضربه‌زننده با در نظر گرفتن سه حالت مختلف، اثر تابع توزیع خواص در ناحیه گرادایانی (توزیع توانی و سیگموئید) و اثر ترتیب قرارگیری لایه‌های فلزی برای نمونه تحت ضربه اشاره داشت. از اهم نتایج حاصل شده می‌توان به کارایی بالاتر نمونه هدفمند گرادایانی در مقایسه با نمونه‌های خالص فلزی اشاره کرد. ضمن آنکه، در حالتی که ضریب $n=1$ در توزیع توانی و سیگموئید لحاظ شود، جذب انرژی نمونه بالاتر است. همچنین مشاهده شده است که لحاظ کردن تابع توزیع سیگموئید سبب رفتار مطلوب‌تر نمونه گرادایانی تحت ضربه سرعت بالا در مقایسه با تابع توزیع توانی بوده است. از بین سه ضربه‌زننده بررسی شده، نتایج عددی حاکی از آن است که میزان مقاومت و جذب انرژی قطعه تحت ضربه در برابر دماغه سر تخت (FLT)، بیشترین و در مقابل دماغه مخروطی (SCN)، کمترین بوده است. علت این نوع رفتار را می‌توان مرتبط با تشکیل پلاگ (Plug) در برخورد دماغه FLT دانست؛ در حالی که در برخورد ضربه‌زننده با دماغه SCN، فقط تشکیل پتال (Petal) مشاهده شده است. در نتیجه می‌توان این گونه بیان کرد که در ضربه سرعت بالا بر روی ماده هدفمند گرادایانی، تشکیل پلاگ نقش مؤثرتری در جذب انرژی در مقایسه با تشکیل پتال دارد.

واژه‌های کلیدی: ضربه سرعت بالا، ماده هدفمند گرادایانی (FGM)، تحلیل اجزای محدود (FEA)، شکل دماغه ضربه‌زننده

High-Velocity Impact on Functionally Graded Materials: A Numerical Study

Mahdi Heydari-Meybodi*

Abstract

Increasing attention of High-Tech industries (e.g., aerospace and defense industries) to functionally graded materials (FGMs) reveals the high performance of these types of materials, which is mainly due to the unique properties of these materials. In the current study, high-velocity impact on AA5083-H11 / Ti-6Al-4V FGMs is conducted numerically in ABAQUS by considering the plastic and damage models of Johnson-cook and utilizing a Python code. Influence of projectile nose (considering three different types of impactor nose), the effect of type of distribution function (Power-law (P-FGM) and Sigmoid (S-FGM)), and the stacking sequence of metallic alloys in the FGM are some of the main parameters investigated in the present study. The results show that FGM samples have a better performance than the pure metallic alloys. Moreover, despite the type of distribution function, the sample with linear distribution (i.e., $n=1$) has the best performance against the impact. However, at the same condition, the S-FGM sample has higher energy absorption than the P-FGM one. Finally, it is realized that the FGM target has a higher impact resistance against a conical-shape (SCN) impactor, rather than a flat-nose (FLT) one. This behavior has been justified via the formation of a petal in the impact of FLT on FGM, while in the impact of SCN on FGM, only plugging formation has been seen. As a result, it can be deduced that in the high-velocity impact on FGMs, petal formation has a higher effect on the energy absorption of target, when compared to the plugging formation.

Key words: High-velocity impact, Functionally graded material (FGM), Finite element analysis (FEA), Projectile nose

* نویسنده پاسخگو: مهدی حیدری میبدی، پست الکترونیک: m.heydari.m@yazd.ac.ir

این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لایسنس از آدرس <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمایید.



مقدمه

صنعتی شدن جوامع و نیاز به مواد با قابلیت‌های مکانیکی بالا و چندمنظوره، استفاده از مواد نو را به امری اجتناب‌ناپذیر و غیرقابل انکار بدل کرده است. یقیناً افزایش دانش جوامع علمی و صنعتی در رابطه با مواد نو مهندسی، مقدمه‌ای برای گسترش کاربرد این مواد و بهره‌بردن از ویژگی‌های فوق‌العاده آن‌ها در قسمت‌های مختلف زندگی است. منظور از مواد نو، آن دسته از مواد مهندسی هستند که در سال‌های اخیر توسعه یافته‌اند. ویژگی‌های منحصر به فرد این مواد منجر به افزایش علاقه و توجه به این مواد شده است؛ چراکه با استفاده از این مواد می‌توان محصولات کوچک‌تر، سبک‌تر، هوشمندتر و چندمنظوره‌تر تولید کرد. در یک دسته‌بندی عمومی، مواد نو را می‌توان به چهار دسته کلی مواد هدفمند، مواد حاوی آلیاژهای حافظه‌دار، مواد مرکب و نانو مواد تقسیم‌بندی کرد که تمرکز این پژوهش بر روی مواد هدفمند گرادانی FGM است.

مواد هدفمند گرادانی پیش از آنکه مورد توجه مهندسی واقع شود، در طبیعت وجود داشته است که از نمونه‌های طبیعی مواد هدفمند می‌توان به بافت زیستی حیوانات (از قبیل دندان و استخوان‌ها) و بافت گیاهان اشاره نمود [۱]. از منظر ظهور این دسته از مواد در کاربردهای مهندسی، ایده اولیه بررسی این ساختار ابتدا در سال ۱۹۷۲ برای کامپوزیت‌ها و مواد پلیمری ارائه شد و مدل‌های مختلفی برای اجزای ترکیبی در پلیمریزاسیون با کاربردهای ممکن برای ساختارهای طبقه‌بندی‌شده توسط بور و دوز [۲] و همچنین شن و بور [۳] پیشنهاد شد؛ ولی به دلیل عدم پیشنهاد روش ساخت مناسبی برای مواد هدفمند، این دو کار ارزش و توجه بالایی را در آن زمان دریافت نکرد [۴]. با این وجود تا سال ۱۹۸۰ بررسی و تحقیق واقعی پیرامون چگونگی ساخت و ارزیابی ساختارهای طبقه‌ای وجود نداشت تا اینکه اصطلاح FGM در سال ۱۹۸۴، توسط دانشمندان علم مواد ژاپنی پیشنهاد گردید. در واقع، ایده اولیه استفاده از مواد هدفمند گرادانی در سال ۱۹۷۸ توسط نینو و همکاران برای پروژه هواپیمای فضایی در آزمایشگاه فضایی ملی ژاپن مطرح گردید. بنا بر مشکلاتی که در صنایع مختلف برای مواد تحت تنش‌های حرارتی بالا وجود داشت، دانشمندان علم مواد در سال ۱۹۸۴ در ژاپن برای اولین بار مواد FGM را به عنوان مواد با تحمل حرارتی بالا پیشنهاد نمودند. از

آن زمان به بعد مطالعات بسیاری برای تکامل مواد مقاوم حرارتی با کارایی بالا و با استفاده از فناوری تقسیم تدریجی وظیفه انجام شده است. به دلیل خاصیت تغییر پیوسته این مواد در فضای با مقیاس ماکروسکوپی، گاهی اوقات استفاده از FGM از نظر رفتار مکانیکی نسبت به مواد با ساختار فیبری، ترجیح داده می‌شود. امروزه مفهوم FGM یک ایده بسیار نوین و جدید است که نه تنها برای موادی که تحت سایش و بارگذاری ترمومکانیکی واقع می‌شوند؛ بلکه برای تولید مواد الکترونیکی، مواد زیست سازگار و مقاوم حرارتی به کار گرفته می‌شود.

مواد هدفمند قادر به تحمل درجه حرارت بالا و اختلاف درجه حرارت شدید بوده و در مقابل خوردگی و سایش مقاوم هستند و مقاومت بالایی در مقابل شکست دارند. در حال حاضر از این مواد برای سازه‌هایی که باید در مقابل درجه حرارت بالا مقاوم باشد، استفاده می‌شود. امکان بهینه کردن تغییرات تنش در مواد هدفمند با تغییر مناسب پروفیل مواد ساختاری از ویژگی‌های برجسته این مواد است. با پیشرفت صنایع جدید، بسیاری از ماشین‌ها و سازه‌ها با دمای بالا مواجه هستند که انواع مختلف بارگذاری‌های حرارتی را در پی خواهد داشت. مشخصه‌های مهم مواد FGM آن‌ها را برای کاربرد در اکثر زمینه‌های مورد نیاز محبوب ساخته است. این دسته از مواد امروزه در تعداد زیادی از صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرند و این ویژگی را دارند تا در آینده در صنایع بیشتری مورد بهره‌برداری قرار گیرند. از نخستین کاربردهای مواد هدفمند در صنعت هوافضا و هواپیمایی بوده است. کاربرد این مواد بدیع طی سالیان گذشته در صنایع هوافضا افزایش داشته است؛ به گونه‌ای که بیشتر ساختار و تجهیزات مورد استفاده درون فضاپیماها از مواد هدفمند تأمین می‌شود. از میان این موارد می‌توان به ترکیبات موتور راکت، ساختار تراس فضاپیما، پنل‌های تعویض هوا، روکش پره‌های توربین و لبه جلویی (پیشانی) موشک‌ها اشاره کرد. بعلاوه، مواد هدفمند گرادانی در بدنه سازه‌هایی که دارای خاصیت عایق حرارت و صدا هستند نیز بکار می‌رود. از دیگر صنایعی که توجه قابل توجهی به مواد هدفمند گرادانی داشته است، صنعت دفاعی و تجهیزات مربوطه بوده است. قابلیت مواد هدفمند در داشتن مقاومت بالا در برابر نفوذ گلوله به واسطه عدم گسترش ترک، ویژگی بارزی است که سبب استفاده این دسته از مواد در صنایع دفاعی شده است. مواد هدفمند را می‌توان در صنایع دفاعی در مواردی از

تمرکز تنش در مناطق بین لایه‌ای به دلیل تغییر ناگهانی خواص در این مناطق (اینترفیس) است [۷] که نتیجه آن، ایجاد میکرو ترک‌ها در آن است. هرچند این ترک‌های ریز و زیربحرانی، باعث شکست ماده نمی‌شوند؛ ولی باعث ایجاد تنش‌های محلی و تمرکز انرژی در مناطق بین لایه‌ای خواهند شد. این مشکل را می‌توان با استفاده از مواد هدفمند گرادایانی حل نمود؛ زیرا این نقاط مشترک بحرانی در FGM وجود ندارند و خواص به صورت تدریجی از ۱۰۰ تا صفر درصد در تمام نقاط ماده تغییر می‌کنند.

بررسی بارگذاری مکانیکی بر روی مواد هدفمند گرادایانی تاکنون در پژوهش‌های مختلفی صورت پذیرفته است که از این میان می‌توان به بررسی مکانیک شکست در مواد هدفمند گرادایانی [۸-۱۰]، بررسی ارتعاش سازه‌های ساخته شده از مواد هدفمند [۱۱-۱۴]، بررسی کماتش مواد هدفمند [۱۵]، بررسی خمش مواد هدفمند تحت بارگذاری استاتیکی [۱۶-۱۹] و بررسی رفتار مواد هدفمند تحت بارگذاری ضربه سرعت پایین [۲۰-۲۳] اشاره کرد.

در زمینه بررسی ضربه سرعت بالا (بالستیک) بر روی مواد FGM که موضوع اصلی پژوهش حاضر است، تحقیقات معدودتری صورت پذیرفته است. از این میان می‌توان به پژوهش اوبیلی و همکاران [۲۴] اشاره کرد. آن‌ها برای انجام ضربه سرعت بالا از نمونه‌های مربعی به طول ضلع ۷ سانتی‌متر و ضخامت‌های مختلف (۱۵، ۲۰ و ۲۵ میلی‌متر) و همچنین دو نوع مختلف ساختاری استفاده کرده‌اند. نتایج ضربه سرعت بالا بر روی ماده هدفمند متشکل از سیلیکون کاربید SiC و آلومینیوم Al ۷۰۷۵ نشان از آن دارد که رفتار کلی ماده هدفمند استفاده شده در این پژوهش ترد بوده است. بعلاوه، در صورت استفاده از ماده هدفمند SiC/Al و برای داشتن سازه مقاوم در برابر ضربه سرعت بالا باید از ضخامت‌های بیشتر از ۲۵ میلی‌متر استفاده نمود. در پژوهشی دیگر، آیدین و آپالاک [۷] به بررسی تجربی ضربه سرعت بالا بر روی ماده هدفمند SiC/Al پرداخته‌اند. آن‌ها ۴ ماده مختلف را مورد بررسی قرار داده‌اند: Al6061 خالص، ماده هدفمند با ترکیب غنی از فلز ($n=0.1$)، ماده هدفمند با ترکیب خطی ($n=1$) و ماده هدفمند با ترکیب غنی از سرامیک ($n=10$). لازم به ذکر است که در این پژوهش، ۱۱ لایه وجود داشته که در نمونه‌های هدفمند، لایه اول و آخر، AL خالص است و لایه ۱۰ ام نیز با ترکیب ثابت ۷۰٪ Al / ۳۰٪ SiC ساخته شده است. پس از بررسی آزمایش‌های

قبیل صفحات زرهی، جلیقه ضدگلوله و ماشین‌های ضدگلوله بکار برد. از دیگر صنایعی که به صورت کاربردی از مواد FGM استفاده کرده‌اند می‌توان به صنایع الکتریکی و الکترونیکی، سیستم‌های تولید انرژی، صنایع خودروسازی، صنایع ابزارهای برشی در ابزارآلات صنعتی و صنایع دریایی اشاره کرد [۵].

ضرورت استفاده از مواد هدفمند گرادایانی در کاربردهای مهندسی به آنجا برمی‌گردد که اتصال قطعات در ساختارهای چند-ماده‌ای، اغلب به صورت اتصال لایه‌ای یکی از مواد که با چسب بر روی ماده‌ی دیگر چسبانده شده است به وجود می‌آیند؛ اما این گونه اتصال سبب ایجاد یک فصل مشترک ضعیف در مرز دو ماده می‌شود که تمرکز تنش را به دنبال دارد. یکی از راه‌های پیشنهاد شده برای غلبه بر این مشکل، انتقال گرادایانی (تدریجی) از یک ماده به ماده دیگر در فصل مشترک است. به عبارت دیگر در مواد کامپوزیتی، فلز و سرامیک لایه‌لایه روی یکدیگر قرار می‌گیرند که مرز بین لایه‌های مختلف می‌تولند نقطه تمرکز تنش و ضعف کامپوزیت در کارکردهای مختلف آن باشد؛ اما این نقاط مشترک بحرانی در FGM وجود ندارند و خواص به صورت تدریجی در تمام نقاط ماده تغییر می‌کنند. در مواد گرادایانی هدفمند (FGM) برای بهینه‌سازی خواص ماده، ترکیب شیمیایی یا ریزساختار کامپوزیت از یک طرف به طرف دیگر آن تغییر می‌کند. نتیجه آنکه در میان این دو سطح، ترکیب ماده به صورت پیوسته تغییر می‌کند و ناحیه گرادایانی نامیده می‌شود [۶].

از سوی دیگر، سازه‌های مهندسی در طول دوره عمر مفید خود، بارگذاری‌های متفاوتی را تجربه می‌کنند که حساسیت مواد در مقابل بارهای ضربه‌ای در مقایسه با بارهای استاتیکی بیشتر است. بارگذاری‌های ضربه‌ای سبب ایجاد خرابی‌های داخلی شده که امکان ردیابی و تشخیص آن‌ها با بازرسی‌های بصری به راحتی میسر نیست. درعین حال، همین خرابی‌های داخلی می‌توانند سبب کاهش استحکام قطعه و رشد خرابی در حین اعمال بارگذاری‌های مجدد شوند. نتیجه آنکه بررسی ضربه ناشی از برخورد اشیای خارجی بر روی سازه‌ها باید به صورت دقیق‌تری بررسی شود. در حالت کلی پذیرفته شده است که در کامپوزیت‌ها، به عنوان یکی از پرمصرف‌ترین مواد نو مهندسی، خرابی با ترک ماتریس آغاز شده و سبب ایجاد جدایش در نواحی بین لایه‌های مجاور با زاویه لایه‌چینی متفاوت می‌گردد. یکی از دلایلی که سبب خرابی در سازه‌های کامپوزیتی می‌شود، وجود

تجربی مختلف، نتیجه شده است که هرچه لایه‌ها در قسمت FGM نازک‌تر باشند، به دلیل تغییر تدریجی‌تر خواص ماده بین دو لایه مجاور، امکان ایجاد جدایش لایه‌ها کاهش یافته و افزایش کارایی نمونه در مقابل ضربه سرعت بالا را به همراه داشته است. در پژوهش صورت گرفته با آزمایش‌های تجربی، هوانگ و چن ماده هدفمند سرامیک/سرامیک Al_2O_3/ZrO_2 را تحت ضربه سرعت بالا بررسی نموده‌اند [۲۵]. نتایج پژوهش آن‌ها نشان می‌دهد که استفاده از ماده هدفمند FGM سبب کاهش ترک‌های بین لایه‌ای شده است. ضمن آنکه تشکیل هسته سرامیکی (که بلافاصله بعد از برخورد گلوله به سرامیک ایجاد شده و هم‌جهت با گلوله حرکت می‌کند) در ماده هدفمند با تأخیر صورت پذیرفته و سبب بهبود عملکرد نمونه گرادایانی تحت ضربه سرعت بالا شده است. بعلاوه، شواهد نشان از آن دارد که ماده هدفمند جذب انرژی بالاتری را از سایر نمونه‌های غیرهدفمند داشته است و بعلاوه، هرچه تعداد لایه‌های هدفمند بیشتر باشد، جذب انرژی سازه بالاتر بوده است.

هوانگ و چن در سال ۲۰۱۶ در پژوهشی دیگر [۲۶] به بررسی ضربه سرعت بالا بر روی ماده هدفمند سرامیک/سرامیک Al_2O_3/ZrO_2 پرداخته‌اند. آن‌ها برای مقایسه بهتر، نمونه با ساختار مشابه با FGM ولی به صورت لایه‌ای که با چسب به هم متصل شده‌اند نیز تحت ضربه بررسی نموده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که استفاده از سرامیک‌ها به صورت FGM، توانسته عملکرد بهتری در برابر ضربه داشته باشد. علت این پدیده این‌گونه توجیه شده است که در سرامیک‌های چندلایه‌ای^۱، به دلیل وجود لایه چسب میانی، تنش کششی بیشتری به لایه بعدی منتقل می‌شود که سبب کاهش کارایی آن‌ها می‌شود. نتیجه آنکه، در صورت استفاده از مواد هدفمند، جدایش بین لایه‌ای وجود نخواهد داشت که همین سبب کاهش موج تنش در لایه اینترفیس لایه‌ها و تعویق رشد ترک و درنهایت، عملکرد بهتر نمونه FGM شده است.

با جمع‌بندی موارد ذکر شده در بخش‌های پیشین، می‌توان دریافت که پژوهش‌های پیشین، به صورت تجربی به بررسی ضربه بر روی مواد FGM پرداخته‌اند و پژوهشی در حوزه مدل‌سازی عددی و بررسی خرابی بر روی مواد هدفمند، خصوصاً مواد

هدفمند فلز/فلز صورت نگرفته است. بعلاوه اینکه مطالعات پیشین به مقایسه مساحت خرابی در نمونه‌ها پرداخته و مقایسه-ای روی سرعت خروجی ضربه‌زننده نمونه‌ها که معیاری از میزان جذب انرژی ماده تحت بارگذاری ضربه‌ای (و به نوعی نمایانگر حد بالستیک نمونه) است، صورت پذیرفته است. با در نظر گرفتن نکات فوق، در پژوهش حاضر به بررسی ضربه سرعت بالا بر روی مواد هدفمند فلز/فلز با احتساب مدل خرابی در مدل عددی پرداخته است. در این میان، همواره سعی شده است تا مقایسه‌ای میان رفتار نمونه FGM با رفتار نمونه فلزی خالص صورت پذیرد تا به اهمیت و کارایی استفاده از مواد هدفمند پی برده شود. همچنین از آنجاکه در مطالعات تجربی، نمونه‌ها عمدتاً بر پایه تابع با توزیع توانی ساخته می‌شوند، در پژوهش حاضر سعی شده تا علاوه بر در نظر گرفتن این نوع توزیع، توزیع سیگموئید که یکی از توابع توزیعی در مواد FGM است نیز لحاظ شده و به مقایسه کارایی این دو نوع توزیع بر روی حد بالستیک نمونه FGM پرداخته شود. بررسی پارامترهای مهم دیگری از قبیل تأثیر توان n در تابع توزیع توانی و سیگموئید بر روی حد بالستیک، تأثیر قرارگیری لایه‌های فلزی در FGM و تأثیر تعداد زیر لایه‌های لحاظ شده در مدل عددی بر روی رفتار نمونه در این پژوهش صورت پذیرفته است. در انتها نیز به بررسی اثر شکل دماغه ضربه‌زننده که یکی از پارامترهای مهم در بحث ضربه سرعت بالا محسوب می‌شود، پرداخته شده و نتایج آن به خوبی تفسیر شده است.

روابط ساختاری و معادلات حاکم بر مواد هدفمند گرادایانی

در مواد گرادایانی هدفمند (FGM) برای بهینه‌سازی خواص ماده، ترکیب شیمیایی یا ریزساختار کامپوزیت از یک طرف به سمت دیگر آن تغییر می‌کند. نتیجه آنکه در میان این دو سطح، ترکیب ماده مطابق شکل ۱ به صورت پیوسته تغییر می‌کند و ناحیه گرادایانی نامیده می‌شود [۶].

¹ multilayer ceramic structure

$$\begin{cases} g_1(z) = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{h/2 - z}{h/2} \right)^n & 0 \leq z \leq h/2 \\ g_2(z) = \frac{1}{2} \left(\frac{h/2 + z}{h/2} \right)^n & -h/2 \leq z \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

مواد هدفمند ساخته شده بر اساس توزیع فوق، S-FGM نامیده می شوند.

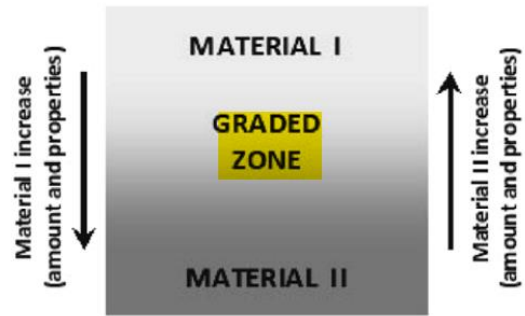
برای حصول خواص مکانیکی مختلف در یک ماده هدفمند، می توان از قانون ساده مخلوطها ROM استفاده کرد. بر این اساس، اگر Q یک خاصیت مکانیکی ماده هدفمند باشد (مثلاً مدول الاستیسیته)، مقدار این کمیت را می توان از رابطه (۳) به دست آورد:

$$Q(z) = Q_{top} g(z) + Q_{bot} (1 - g(z)) \quad (3)$$

که در رابطه فوق، Q_{top} و Q_{bot} به ترتیب خاصیت مکانیکی در لایه بالایی و لایه پایینی را نشان می دهند. ضمن آنکه از اثرات تغییر دما در حصول رابطه فوق صرف نظر شده است.

لازم به ذکر است که در پژوهش های پیشین از رابطه فوق فقط برای بسط خواصی مثل مدول الاستیسیته و چگالی استفاده شده است. با توجه به اینکه در این پژوهش لازم است تا خرابی در لایه های FGM هم دیده شود، فرض شده است که رابطه قانون ROM با استفاده از تابع توانی برای سایر خواص از جمله ضرایب مدل پلاستیک و خرابی جانسون کوک، مقدار انرژی شکست و سایر ضرایب گرمائی نیز برقرار باشد. به عنوان مثال در صورتی که ضریب d_1 در مدل خرابی جانسون کوک در لایه بالایی برابر d_{1Top} و در لایه پایینی برابر d_{1Bot} بوده و تابع توزیع توانی برای لایه بالایی تعریف شده به صورت $g(z) = \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right)^n$ باشد، در این صورت مقدار d_{1FGM} که در فاصله z از وسط ضخامت ناحیه FGM قرار دارد، به صورت رابطه (۴) محاسبه می شود:

$$\begin{aligned} d_{1FGM}(z) &= d_{1Top} \times g(z) + d_{1Bot} \times (1 - g(z)) \\ &\Downarrow \\ d_{1FGM}(z) &= d_{1Bot} + (d_{1Top} - d_{1Bot}) \times \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right)^n \end{aligned} \quad (4)$$



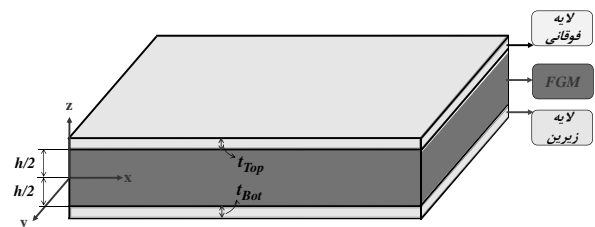
شکل ۱ - شماتیک ساختار مواد هدفمند گرادینانی [۶]

نقش کلیدی در تعیین خواص مواد هدفمند گرادینانی، تابعی است که نحوه تغییر خواص را در راستای ضخامت تبیین می کند. برای تعیین کسر حجمی فاز اول برحسب مختصات در راستای ضخامت z ، توابع مختلفی وجود دارد که در اینجا به دو تابع مهم اشاره شده است:

یکی از پرکاربردترین آن ها تابع توزیع توانی (Power-law function) است:

$$g(z) = \left(\frac{2z + h}{2h} \right)^n \quad (1)$$

به ماده هدفمند گرادینانی شکل گرفته بر اساس توزیع توانی، P-FGM گفته می شود. در رابطه (۱)، h ضخامت ناحیه گرادینانی و n ضریب تابع توزیع توانی [۱۰] است که نحوه تغییر خواص را در راستای ضخامت تبیین می کند. شکل ۲ نحوه در نظر گرفتن دستگاه های مختصات را بهتر نشان می دهد:



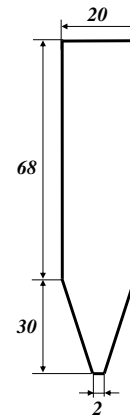
شکل ۲ - شماتیک پارامترهای هندسی یک ماده هدفمند گرادینانی

تابع دیگری که برای توزیع خواص مادی در راستای ضخامت در یک ماده هدفمند استفاده می شود، تابع سیگموئید (Sigmoid) یا S-شکل است که به صورت رابطه (۲) تعریف می شود [۲۷]:

مدل سازی المان محدود (FEA)

بدون شک مهم ترین بخش مدل سازی اجزای محدود در این پژوهش، نحوه مدل سازی بخش گرادیانی (FGM) بوده است. در این قسمت، برای مدل سازی اجزای محدود، از نرم افزار ABAQUS استفاده شده است. در ادامه، در ابتدا سایر موارد (از جمله مدل سازی هندسه، بیان مدل های خرابی و ...) بیان شده و در انتها به تشریح مدل سازی بخش FGM پرداخته شده است.

- با توجه به هزینه محاسباتی بالای مدل سازی مواد هدفمند و با توجه به وجود شرط تقارن محوری کلیت مسئله، در این پژوهش مدل سازی به صورت Axisymmetric صورت پذیرفته است. بدین منظور ضربه زننده به صورت صلب و با analytical rigid و ورق دایروی به قطر 500 mm به صورت Axisymmetric Deformable مدل شده است. هندسه ضربه زننده در پژوهش حاضر به صورت مخروطی مطابق با ابعاد بیان شده در شکل ۳ و به جرم 196 gr (مشابه با ابعاد و جرم بیان شده در مرجع [۲۸]) در نظر گرفته شده است:

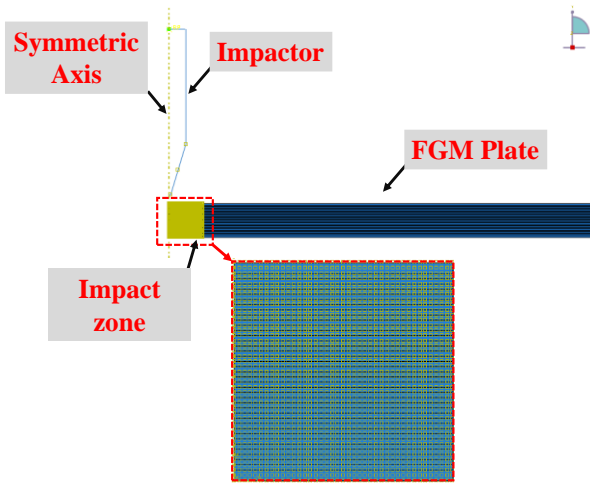


شکل ۳- ابعاد ضربه زننده (به میلی متر) استفاده شده در

مرجع [۲۸]

- شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای هدف به صورت کاملاً گیردار بوده است. به همین دلیل، تمام درجات آزادی گوشه های ورق دایروی گرفته شده است.
- از طرف دیگر، به دلیل تغییرات شدید تنش در ناحیه اطراف ضربه در ضربه سرعت بالا و به منظور افزایش دقت حل، ناحیه زیر ضربه زننده قسمت بندی

(partition) شده و از المان های ریزتر در این ناحیه اعمال شده است. شکل ۴ این نکته را بهتر نشان می دهد.



شکل ۴- نمایی از المان بندی صورت گرفته و ناحیه زیر ضربه زننده

نوع المان برای لایه های فلزی CAX4R از نوع تقارن محوری و با نوع تحلیل Explicit و المان های linear انتخاب شده است.

- از طرف دیگر با توجه به اینکه فلزات به صورت ماده ای نرم در نظر گرفته می شوند، لازم است تا ضمن مدل سازی بخش الاستیک و فاز پلاستیک آن ها، فاز خرابی نیز برای آن ها تعریف شود. بدین منظور با نفوذ گلوله درون هدف و رسیدن ماده به حدی از خرابی، المان های دارای شرایط خرابی حذف شده و نفوذ ضربه زننده درون هدف ادامه پیدا کند. با توضیحات فوق، رفتار الاستیسیته فلز به صورت Elastic isotropic، رفتار پلاستیک آن با سفت-شوندگی Johnson-Cook و رفتار خرابی آن با مدل Johnson-Cook Damage بیان گردیده است. لازم به توضیح است که مدل سفت شوندگی جانسون-کوک با رابطه (۵) بیان می شود [۲۹]:

$$\bar{\sigma} = \left[A + B \left(\bar{\epsilon}^{pl} \right)^\alpha \right] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right) \right] \left(1 - \hat{\theta}^m \right) \quad (5)$$

در رابطه (۵)، ضرایب A, B, C, m, n مربوط به جنس ماده هستند. بعلاوه مدل خرابی جانسون-کوک در آباکوس برای فلزات نرم در نظر گرفته شده است. این

$$A_{FGM}(z) = A_{top} \times g(z) + A_{bot} \times (1 - g(z)) \quad (9)$$

جدول ۱ - ضرایب جانسون کوک و سایر خواص برای آلیاژ Ti-6Al-4V [۳۱, ۳۰]

Elastic modulus, E (GPa)		110.7
Poisson's ratio		0.37
The Johnson-Cook plastic model	A (MPa)	1098
	B (MPa)	1092
	α	0.93
	m	1.1
	C	0.014
$(1/s)\dot{\epsilon}_0$		1
Melting temperature, T_{melt} (K)		1878
Room temperature, T_{room} (K)		293
Density (kg/m ³)		4428
The Johnson-Cook damage model	d_1	-0.09
	d_2	0.25
	d_3	-0.5
	d_4	0.014
	d_5	3.87

جدول ۲ - ضرایب جانسون کوک و سایر خواص برای آلیاژ Al 5083-H116 [۳۳, ۳۲, ۲۸]

Elastic modulus, E (GPa)		70
Poisson's ratio		0.3
The Johnson-Cook plastic model	A (MPa)	124
	B (MPa)	456
	α	0.252
	m	0.859
	C	0.008
$(1/s)\dot{\epsilon}_0$		1
Melting temperature, T_{melt} (K)		893
Room temperature, T_{room} (K)		293
Density (kg/m ³)		2700
The Johnson-Cook damage model	d_1	0.0261
	d_2	0.263
	d_3	-0.349
	d_4	0.147
	d_5	16.8

- نکته مهم دیگر در مدل سازی بخش FGM، این است که با مشاهده یک ماده هدفمند FGM در دنیای واقعی، می توان دریافت که خواص آن در راستای ضخامت به صورت پله ای و گسسته از یک لایه به لایه بعد تغییر می کند. با در نظر گرفتن این نکته، ساده ترین روش برای مدل سازی ماده هدفمند از طریق شبیه سازی المان محدود به این صورت است که کل ضخامت یا حجم ماده در راستای مورد نظر به تعدادی واحد کوچک تر تبدیل شده و خواص هر لایه

مدل خرابی، در بارگذاری دینامیکی با نرخ کرنش بالا (مثل بارگذاری ضربه ای) مورد استفاده قرار می گیرد. در این مدل، خرابی در صورتی اتفاق می افتد که پارامتر خرابی ω (رابطه (۶)) به مقدار واحد برسد [۲۹]:

$$\omega = \sum \left(\frac{\Delta \bar{\epsilon}^{pl}}{\bar{\epsilon}_f^{pl}} \right) \quad (6)$$

در رابطه (۶)، $\Delta \bar{\epsilon}^{pl}$ کرنش پلاستیک معادل مرحله ای و $\bar{\epsilon}_f^{pl}$ کرنش در لحظه شکست است که به صورت رابطه (۷) تعریف می شود [۲۹]:

$$\bar{\epsilon}_f^{pl} = [d_1 + d_2 \exp(d_3 \frac{p}{q})] \cdot \frac{pl}{\dot{\epsilon}_0} * [1 + d_4 \ln(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0})] * (1 + d_5 \hat{\theta}) \quad (7)$$

ضرایب $d_1 - d_5$ در رابطه (۷)، مرتبط با نوع ماده می باشند. به منظور در نظر گرفتن گسترش خرابی، در پژوهش حاضر از گسترش بر مبنای انرژی استفاده شده است. ضمن آنکه میزان Fracture Energy نیز بر اساس رابطه (۸) تعریف گردیده است [۲۹]:

$$\frac{K_{Ic}^2}{E} \quad (8)$$

که در رابطه (۸) K_{Ic} چقرمگی شکست ماده و E مدول الاستیسیته فلز است.

- در مدل سازی حاضر، از آلیاژ تیتانیوم (Ti-6Al-4V) به عنوان لایه بالایی و آلیاژ آلومینیوم (Al 5083-H116) به عنوان لایه زیرین استفاده شده است. خواص مکانیکی مورد نیاز برای هرکدام از این آلیاژها در جدول ۱ و جدول ۲ آورده شده است.

- نکته مهم برای مدل سازی بخش گرادیانی (بین لایه بالا و لایه پایین)، استفاده از رابطه (۳) برای حصول هرکدام از خواص مکانیکی و پارامترهاست. به عنوان مثال، برای محاسبه ضریب A در مدل سفت شوندگی جانسون-کوک از رابطه زیر استفاده شده است:

متناسب به توزیع در نظر گرفته شده به هر لایه اختصاص داده شود [۸، ۲۰، ۳۴]. نکته قابل توجه اینکه برای پرهیز از اثرات جانبی به دلیل غیر پیوسته بودن خواص ماده، باید المان‌های در نظر گرفته کوچک بوده و یا به طور معادل، تعداد تقسیمات به اندازه کافی زیاد در نظر گرفته شود [۳۵].

با در نظر گرفتن نکته فوق، در این پژوهش نیز بخش FGM به تعدادی لایه نازک‌تر در راستای ضخامت تقسیم شده است که هر لایه خود به صورت همگن و ایزوتروپ است. برای تعیین خواص هر لایه نازک، Z متوسط سطح بالا و پایین این لایه به عنوان پارامتر مؤثر هر لایه در فرمول‌ها قرار داده می‌شود.

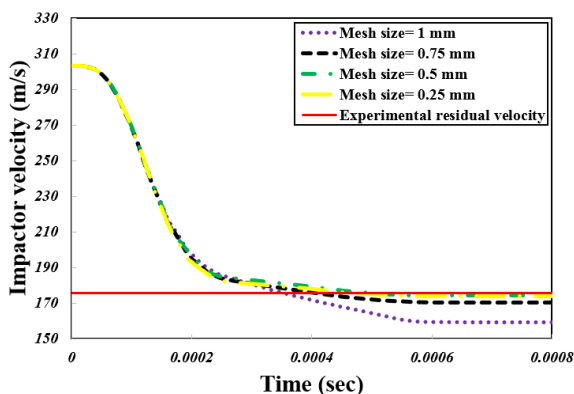
با توجه به توضیحات فوق، واضح است که انجام عملیات محاسباتی برای خواص مکانیکی هر لایه و همچنین، ایجاد تعداد لایه‌های زیاد به عنوان بخش FGM به صورت دستی، امری دشوار و زمان‌بر است؛ به همین دلیل، در پژوهش حاضر نکات فوق به صورت کدنویسی به زبان Python در نرم‌افزار آباکوس صورت پذیرفته است تا هزینه محاسباتی کار به صورت قابل توجهی کاهش یابد.

اعتبارسنجی مدل المان محدود

برای اعتبارسنجی مدل‌سازی عددی صورت گرفته در قسمت قبل، نتایج حاصل از مدل عددی حاضر برای ضربه سرعت بالا بر روی فلز آلومینیوم به تنهایی (بدون در نظر گرفتن ماده هدفمند) با پژوهش تجربی صورت گرفته در مرجع [۲۸، ۳۳] مقایسه شده است. لازم به ذکر است که تاکنون ضربه سرعت بالا بر روی ماده هدفمند فلز/فلز در پژوهش‌های پیشین صورت نگرفته است و به همین دلیل ناگزیر به اعتبارسنجی با مدل فلزی تنها هستیم. در مرجع [۲۸] خواص مکانیکی فلز آلومینیوم مطابق با داده‌های جدول ۲ و اندازه و ابعاد ضربه زننده مطابق با شکل ۳ بوده است. سرعت اولیه ضربه زننده برابر با 303m/s بوده است که سرعت گلوله بعد از خروج از هدف برابر با 175.6m/s گزارش شده است.

با توجه به این نکته که در مدل‌سازی ضربه با سرعت بالا، اندازه المان‌ها نقش کلیدی بر روی دقت جواب‌ها دارد، به منظور حصول اندازه مناسب برای المان‌ها، آنالیز حساسیت به مش

صورت پذیرفته است. چهار اندازه مختلف برای المان‌های واقع در ناحیه زیر ضربه زننده در اینجا در نظر گرفته شده است (۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ میلی‌متر). نمودار سرعت-زمان به ازای هر اندازه المان به دست آمده و نتایج در شکل ۵ آورده شده است.



شکل ۵ - تأثیر اندازه المان در نمودار سرعت - زمان ضربه زننده در پژوهش [۳۳]

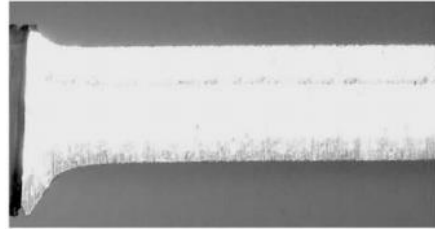
توجه داشته باشید که خط توپر افقی (قرمز رنگ در نسخه الکترونیکی) در شکل ۵، بیانگر نمودار سرعت-زمان استخراج شده از مرجع [۳۳] نبوده و صرفاً سرعت باقیمانده (سرعت خروجی) ضربه زننده از هدف در آزمون تجربی را نشان می‌دهد.

از شکل ۵ دو نکته زیر را می‌توان استنباط نمود:

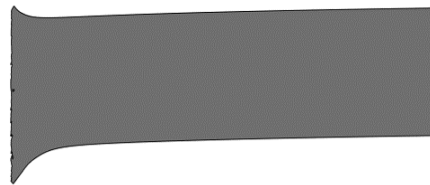
- سرعت خروجی ضربه زننده به ازای اندازه المان‌های ۰/۷۵ و ۱ میلی‌متر خطای قابل توجهی دارد؛ بنابراین استفاده از این اعداد برای اندازه المان‌های زیر ناحیه ضربه زننده می‌تواند خطای قابل توجهی در مدل‌سازی ایجاد نماید.
- از طرف دیگر، می‌توان دریافت که اندازه المان ۰/۲۵ و ۰/۵ هر دو دارای دقت بسیار بالایی هستند؛ ولی از آنجاکه سایز ۰/۵ هزینه محاسباتی کمتر (و دقت محاسباتی مشابهی دارد)، سایز المان در تمام این پژوهش برابر با ۰/۵ برای ناحیه زیر ضربه زننده در نظر گرفته شده است.

به منظور اعتبارسنجی مضاعف مدل عددی، می‌توان شکل مقطع برش خورده حاصل از آزمون تجربی (در شکل ۶) و

حاصل از مدل عددی (در شکل ۷) را با یکدیگر مقایسه کرد. همان‌طور که از این دو شکل مشخص است، خرابی حاصل‌شده بین مدل عددی و تجربی تطابق بسیار خوبی دارد؛ فلذا می‌توان ادعا کرد که مدل‌سازی صورت پذیرفته دارای دقت بالایی بوده و نتایج آن می‌تواند قابل‌اتکا باشد.



شکل ۶ - سطح برش خورده از نمونه، بعد از انجام ضربه در پژوهش [۳۳]



شکل ۷ - سطح برش خورده از نمونه، بعد از انجام ضربه در مدل‌سازی عددی پژوهش حاضر

الف) تأثیر تعداد لایه در نظر گرفته‌شده در ناحیه

گرادیانی

از نکات قابل‌توجه در مواد هدفمند، بررسی این نکته است که برای بخش میانی که تغییر خواص به‌صورت گرادیانی وجود دارد، چه تعداد زیر لایه در نظر گرفته شود تا خواص مطلوبی را به دست بدهد. به‌عبارت‌دیگر، همان‌طور که پیش‌تر در بخش مدل‌سازی عددی ذکر شد، بخش FGM به تعدادی لایه نازک‌تر در راستای ضخامت تقسیم‌شده است که هر لایه خود به‌صورت همگن و ایزوتروپ است. بررسی این نکته که تعداد این زیر لایه‌ها چه تأثیری بر رفتار ماده بالستیک دارد در این بخش مورد بررسی قرار گرفته است.

برای ماده هدفمند با در نظر گرفتن توزیع توانی P-FGM Ti/Al در حالت $n=1$ ، تعداد لایه‌های تشکیل‌دهنده بخش میانی (هدفمند) از مقادیر کم (۵) تا زیاد (۱۰۰) تغییر داده‌شده است و مقدار سرعت خروجی ضربه زنده به ازای سرعت ورودی ثابت ۳۰۳ متر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج آن در جدول ۳ نمایش داده‌شده است. ذکر این نکته نیز الزامی است که سائیز و تعداد المان‌ها در تمام این مدل‌سازی‌ها به‌صورت تقریباً برابری با یکدیگر در نظر گرفته‌شده است تا اثر تعداد المان بر روی نتایج مدل‌سازی حذف گردد.

جدول ۳ - خواص مکانیکی و حرارتی T3 و T6

تعداد لایه	سرعت خروجی	
	ضربه‌زنده	(متر بر ثانیه)
۵	۱۲۴	
۲۰	۱۰۹	
۴۰	۸۷	
۶۰	۷۶	
۸۰	۷۷	
۱۰۰	۸۱	

همان‌طور که از جدول ۳ مشخص است، به ازای تغییر تعداد لایه از ۵ به ۴۰، میزان تغییرات سرعت خروجی ضربه

ارائه نتایج و بحث بر روی آن‌ها

به‌منظور بررسی عملکرد ماده FGM در شرایط مختلف، مدل‌سازی عددی در تمام بخش‌های این قسمت (مگر در قسمت انتهایی این بخش که شکل ضربه‌زنده تفاوت دارد) با احتساب موارد ذیل صورت پذیرفته است:

- لایه بالایی از جنس Ti و لایه زیرین از جنس Al (FGM Ti/Al) با خواص مکانیکی بیان‌شده در جداول ۱ و ۲
 - ضخامت لایه بالایی و پایینی هرکدام برابر با ۱ میلی‌متر
 - ماده هدفمند تحت ضربه به‌صورت ورق دایروی به شعاع ۲۵۰ میلی‌متر بوده و ضخامت کل ماده هدفمند (مجموع ضخامت لایه بالایی، پایینی و ناحیه گرادیانی) برابر با ۲۰ میلی‌متر لحاظ شده است.
 - سرعت اولیه ضربه زنده برابر با 303m/s
 - هندسه ضربه زنده مطابق با شکل ۳ و جرم آن برابر با ۱۹۶ گرم.
- نتایج به‌دست‌آمده در ادامه بیان‌شده است.

لایه‌ها، هزینه محاسباتی (زمان لازم برای اتمام اجرا Run مسئله) به صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد. با توضیحات

این پارامتر می‌توان به میزان جذب انرژی هدف طی فرآیند ضربه پی برد. به عبارت دیگر، هرچه سرعت خروجی ضربه‌زننده پس از عبور از هدف کمتر باشد، نشان از آن دارد که میزان جذب انرژی قطعه تحت ضربه (هدف) در طول بارگذاری ضربه‌ای بیشتر بوده است (و بالعکس).

نکته اول استنباط شده از شکل ۸ در ارتباط با اثر توان n ماده P-FGM بر روی سرعت خروجی ضربه‌زننده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در حالتی که $n=1$ باشد، کمترین سرعت خروجی وجود دارد. به عبارت دیگر، بیشترین میزان جذب انرژی میان نمونه‌های هدفمند با توزیع توانی حالتی بوده است که $n=1$ (توزیع خواص به صورت خطی) باشد. علت این پدیده آن است که در حالتی که $n=1$ باشد، گرادیان تغییر خواص از لایه زیرین به لایه بالایی کمتر است (خواص به صورت تدریجی‌تر تغییر می‌کند)؛ بنابراین مشابه با کامپوزیت‌های الیافی (که هر چه میزان تغییر زاویه بین لایه‌های مجاور کمتر باشد، عملکرد نمونه تحت ضربه بهتر است)، در نمونه FGM هم چنین توجیهی امکان‌پذیر است.

دومین نکته را می‌توان مرتبط با اثر FGM در مقایسه با آلیاژ خالص دانست. همان‌طور که از داده‌های شکل ۸ مشاهده می‌شود، فارغ از ضریب n در ماده هدفمند، سرعت خروجی ضربه‌زننده تمام نمونه‌های P-FGM از سرعت خروجی ضربه‌زننده برای آلیاژهای تیتانیوم و آلومینیوم خالص کمتر است. به عبارت دیگر رفتار ماده FGM حتی در بدترین حالت (n های زیاد که گرادیان تغییرات خواص زیاد است) نیز از رفتار آلیاژهای فلزی خالص بهتر است. این نکته اهمیت استفاده از مواد هدفمند و کارایی بالای نمونه FGM در جذب انرژی در مقایسه با آلیاژهای خالص را آشکار می‌سازد.

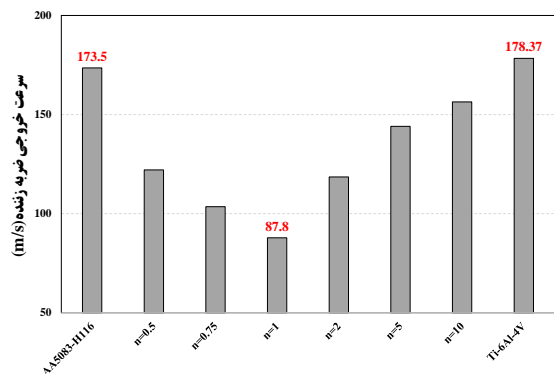
نکته پایانی استنباط شده از شکل ۸ درباره مقایسه سرعت خروجی نمونه آلیاژ آلومینیوم و تیتانیوم است. همان‌طور که مشخص است، سرعت خروجی نمونه آلیاژ آلومینیوم از نمونه تیتانیوم کمتر و در نتیجه، جذب انرژی آن بیشتر است. در نتیجه در صورت استفاده از آلیاژ خالص برای ساخت سپرهای دفاعی، استفاده از آلومینیوم در مقایسه با تیتانیوم (صرفاً از منظر جذب انرژی) توصیه می‌گردد.

زننده حدود ۴۰ درصد بوده است؛ در حالی که میزان تغییرات سرعت خروجی به ازای تغییر تعداد لایه از ۴۰ تا ۱۰۰ لایه حدود ۱۰ درصد است. دقت داشته باشید که با افزایش تعداد داده‌شده، در تمام مراحل پژوهش حاضر، تعداد لایه‌های ماده هدفمند برابر با ۴۰ واحد در نظر گرفته شده است؛ چراکه علاوه بر هزینه محاسباتی بهینه، جواب‌های قابل قبولی را به دست می‌دهد.

(ب) مقایسه عملکرد ماده هدفمند با توزیع توانی)

(P-FGM) با آلیاژهای خالص تحت ضربه سرعت بالا

هدف از بررسی این قسمت، پی بردن به اهمیت استفاده از مواد هدفمند گرادیانی در مقایسه با مواد خالص فلزی است. بدین منظور، مدل‌سازی عددی برای ماده هدفمند با احتساب شش مورد مختلف به ازای ضریب n در رابطه تابع توانی ($n=1,2,5,10$) صورت پذیرفته است و سرعت خروجی ضربه‌زننده به دست آمده است. از طرف دیگر، دو حالت دیگر نیز به صورت مجزا بررسی شده است: حالتی که کل ضخامت ماده (۲۰ میلی‌متر) متشکل از آلیاژهای خالص فلزی باشد. در این دو مورد نیز، مدل عددی انجام شده و سرعت ضربه‌زننده بعد از خروج از هدف استخراج شده است. نتایج مقایسه‌ای میان این هشت حالت در شکل ۸ گردآوری شده است.



شکل ۸ - مقایسه سرعت خروجی نمونه P-FGM با نمونه‌های ساخته‌شده از آلیاژهای خالص

با بررسی شکل ۸ می‌توان به نکات ارزشمندی دست‌یافت. پیش از ارائه این نکات لازم به توضیح است که با توجه به سرعت اولیه در نظر گرفته شده، در تمامی موارد مدل شده در طول این پژوهش گلوله پس از نفوذ درون هدف به صورت کامل از آن عبور می‌کند. سرعت خروجی از هدف به‌عنوان یک پارامتر مهم در مباحث ضربه سرعت بالا همواره مطرح بوده است. اهمیت این پارامتر در مباحث ضربه بدین دلیل است که از روی

همان‌طور که پیش‌ازاین بیان شد، خواص مکانیکی در ناحیه گرادایانی به تابع خواص در نظر گرفته‌شده در این قسمت وابسته است. بدین منظور و برای بررسی تأثیر انتخاب تابع در این قسمت، تأثیر این مطلب که در ماده هدفمند، لایه آلومینیومی خالص در بالا باشد و یا لایه تیتانیومی و تأثیر آن بر روی رفتار بالستیک نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. دو ماده هدفمند زیر مورد بررسی قرار گرفته است:

- ورق هدفمند با نماد FGM Ti/Al: لایه بالایی به ضخامت 1mm از آلیاژ تیتانیوم، لایه پایینی به ضخامت 18mm از آلیاژ آلومینیوم و مابین این دو قسمت به ضخامت 18mm به صورت گرادایانی تغییر خواص وجود داشته باشد.

- ورق هدفمند با نماد FGM Al/Ti: لایه بالایی به ضخامت 1mm از آلیاژ آلومینیوم و مابین این دو قسمت به ضخامت 18mm به صورت گرادایانی تغییر خواص وجود داشته باشد.

در این تحلیل، توان n تابع توزیع توانی نیز برابر ۱ در نظر گرفته‌شده است تا اثر سایر پارامترها حذف گردد. مدل‌سازی در این دو حالت صورت پذیرفته و نتایج سرعت خروجی برای پرتابه بدین صورت حاصل شده است:

- سرعت خروجی برای FGM Ti/Al برابر با 87.8m/s شده است

- سرعت خروجی برای FGM Al/Ti برابر با 77.7m/s به دست آمده است.

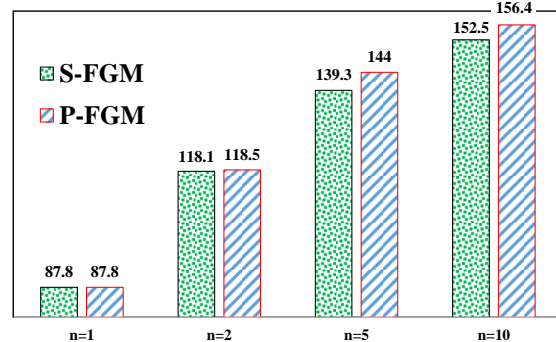
با مقایسه دو عدد فوق می‌توان دریافت که از مقایسه حالت بهینه هر دو حالت (حالت بهینه در برابر ضربه بالستیک برای هر دو حالت وقتی است که $n=1$ باشد)، رفتار بالستیک نمونه هدفمند با لایه روئین از جنس آلومینیوم بهتر است از نمونه مشلیه با لایه روئین از تیتانیوم. به عبارت دیگر، در حالت مشابه $n=1$ جذب انرژی ماده هدفمندی که آلومینیوم در ابتدا با گلوله در تماس بوده است بیشتر از حالتی است که گلوله در ابتدا با تیتانیوم تماس داشته است.

علت این رفتار را میتوان با بررسی مجموعه خواص مکانیکی آلومینیوم و تیتانیوم که در رفتار خرابی آنها تأثیرگذارند، توجیه نمود. بدین صورت که خواص مکانیکی شامل مدول الاستیسیته، چگالی، چقرمگی شکست و انرژی لازم برای شکست فلز تیتانیوم مقادیر بزرگتری در مقایسه با فلز آلومینیوم دارد؛ فلذا رفتار بهتری از این فلز در مقایسه با

ج) تأثیر تابع توزیع توانی بر روی رفتار ضربه‌های

نمونه

توزیع خواص (تابع توانی رابطه (۱) و یا توزیع سیگموئید رابطه (۲))، در شرایط کاملاً برابر، مدل‌سازی عددی به ازای دو توزیع مختلف (توانی و سیگموئید) و با در نظر گرفتن چهار عدد مختلف برای توان n صورت پذیرفته و سرعت خروجی گلوله از هدف در حالات مختلف در شکل ۹ آورده شده است.



شکل ۹ - اثر تابع توزیع خواص (توانی P و سیگموئید S) بر روی سرعت خروجی ضربه‌زننده در ماده FGM

همان‌طور که از شکل ۹ مشاهده می‌شود، در حالتی که $n=1$ (توزیع خطی) باشد، سرعت خروجی ضربه‌زننده نمونه‌ها مستقل از نوع تابع توزیع است. علت آن است که در حالتی که $n=1$ باشد، توزیع خواص ناشی از توزیع توانی P با توزیع سیگموئید S کاملاً بر یکدیگر منطبق هستند. با افزایش ضربه n در هر دو تابع توزیعی، سرعت خروجی ضربه‌زننده افزایش و در نتیجه، میزان جذب انرژی نمونه کاهش می‌یابد.

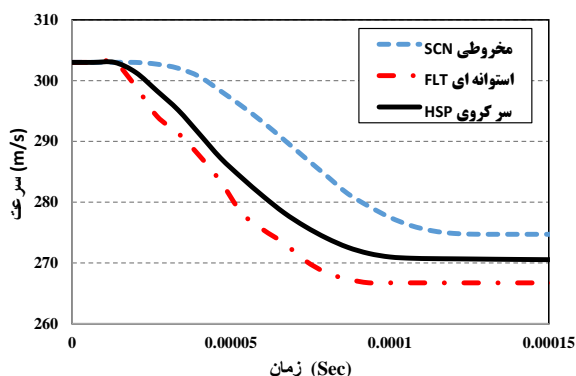
نکته مهم‌تر از این قسمت آن است که سرعت خروجی ضربه‌زننده نمونه‌های با توزیع سیگموئید S-FGM از نمونه‌ها با توزیع توانی P-FGM کمتر است. می‌توان نتیجه گرفت که طراحی و ساخت نمونه‌های FGM با در نظر گرفتن توزیع سیگموئید جذب انرژی بیشتری را برای نمونه به دنبال خواهد داشت که به‌عنوان یک ملاحظه طراحی و ساخت می‌توان به آن اشاره کرد.

د) تأثیر ترتیب لایه‌های فلزی بر روی رفتار بالستیک

نمونه

ه) تأثیر شکل دماغه ضربه‌زننده بر روی رفتار بالستیک نمونه

یکی از مباحث مهم در بحث ضربه سرعت بالا، تأثیر شکل نوک (دماغه) ضربه‌زننده بر روی رفتار بالستیک نمونه است. SCN بیشترین و برای ضربه‌زننده FLT کمترین مقدار است. تفسیر این سرعت خروجی آن است که عملکرد و جذب انرژی ماده هدفمند در مقابل ضربه‌زننده FLT بهترین بوده است؛ درحالی‌که عملکرد ماده هدف در مقابل ضربه‌زننده SCN نامطلوب‌ترین مورد بوده است. این رفتار را می‌توان بدین صورت توجیه کرد که در حالتی که ضربه‌زننده سر تخت FLT باشد، راستای حرکت ضربه‌زننده در کل مسیر عمود بر راستای قرارگیری ماده تحت ضربه است؛ بنابراین ماده مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد. به عبارت بهتر، ضربه‌زننده FLT برای عبور از هدف در این حالت، ناچار به بریدن ماده و پیشروی است؛ درحالی‌که در حالت ضربه‌زننده سر مخروطی SCN که تیزی بیشتری دارد و راستای حرکت ضربه‌زننده در راستای ضخامت ماده هدف در ابتدای تماس به صورت مورب است، ضربه‌زننده با سوراخ کردن هدف به حرکت خود ادامه می‌دهد؛ بنابراین ماده فرصت کافی برای مقاومت در برابر نفوذ ضربه‌زننده را ندارد. برای حالت ضربه‌زننده سر کروی HSP، به دلیل اینکه پروفیل تماس به صورت کروی است و حالت ملایم‌تری نسبت به ضربه‌زننده مخروطی دارد، بنابراین ماده هدف فرصت بیشتری برای مقاومت را نسبت به ضربه‌زننده سر مخروطی داراست. داشتن فرصت بیشتر برای مقاومت ماده به معنای جذب انرژی بیشتر سازه است که داده‌های سرعت خروجی به دست آمده مؤید این مطلب است.



شکل ۱۱- نمودار سرعت-زمان به ازای سه ضربه‌زننده با شکل دماغه‌های متفاوت

آلومینیوم هنگامی که در لایه رویین قرار گیرد مورد انتظار است.

لازم به ذکر است برای اینکه بتوان به نتایج حاصل‌شده از این قسمت اتکا کرد و نتایج منطبق بر واقعیت‌های فیزیکی باشد، بایستی قطر، سرعت و جرم ضربه‌زننده در تمامی این موارد یکسان باشد تا نتایج حاصل‌شده، مستقل از این موارد باشد. بدین منظور و با بررسی پژوهش‌های پیشین، پژوهش [۳۶] انتخاب گردیده است. مطابق با ضربه‌زننده‌های استفاده شده در مرجع [۳۶]، سه ضربه‌زننده زیر انتخاب شده است:

- ضربه‌زننده مخروطی (SCN)
- ضربه‌زننده استوانه‌ای (FLT)
- ضربه‌زننده سر کروی (HSP)

تصاویر و ابعاد هر کدام از این ضربه‌زننده به تفکیک در شکل ۱۰ آورده شده است:

نام ضربه‌زننده	شکل هندسی	ابعاد دماغه (به میلی‌متر)	طول کلی ضربه‌زننده (به میلی‌متر)
ضربه‌زننده با دماغه مخروطی (SCN)		52° 9	۲۷
ضربه‌زننده استوانه‌ای (FLT)		9	۳۰
ضربه‌زننده با دماغه کروی (HSP)		4.5 9	۲۷

شکل ۱۰- اثر شکل هندسی و ابعاد ضربه‌زننده‌های استفاده برای بررسی اثر شکل دماغه بر روی رفتار بالستیک نمونه‌ها

لازم است که جرم و سرعت ضربه‌زننده در این قسمت کاملاً مشابه با قسمت‌های پیشین پژوهش لحاظ شده است (جرم ۱۹۶ گرم و سرعت اولیه 303 m/s)؛ ضمن آنکه ماده هدفمند استفاده شده در این قسمت از نوع FGM Ti/Al با توزیع توانی $n=1$ بوده است.

نمودار سرعت-زمان به ازای سه شکل دماغه متفاوت ضربه‌زننده در شکل ۱۱ آورده شده است. همان‌طور که از شکل ۱۱ مشخص است، سرعت خروجی ضربه‌زننده برای ضربه‌زننده

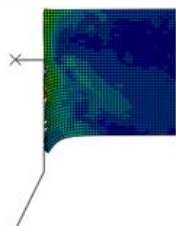
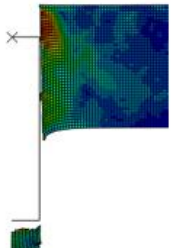
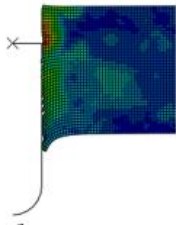
قابل توجه در بارگذاری های سرعت بالا بیان شود. در صورتی که بعد از عبور ضربه زننده از هدف، قسمتی از قطعه هدف به صورت برشی از قطعه جدا شود، به این قسمت جدا شده در اصطلاح پلاگ گفته می شود. در حالتی که با گذر ضربه زننده از هدف،

مربوط به وابستگی جذب انرژی به شکل دماغه می توان به این نتیجه مهم دست یافت که در مواد هدفمند گرادپانی، تشکیل پلاگ که در واقع یک ناحیه برشی در زیر ضربه زننده است، سهم قابل توجهی در جذب انرژی سازه را دارد؛ درحالی که تشکیل پتال نمی تولد مقاومت چندانی را در برابر نفوذ ضربه زننده به درون هدف داشته باشد. به همین دلیل است که ضربه زننده FLT کمترین سرعت خروجی ضربه زننده (و بیشترین جذب انرژی سازه) و ضربه زننده SCN بیشترین سرعت خروجی (و کمترین جذب انرژی سازه) را داراست. شاهد دیگری بر این گواه، نفوذ ضربه زننده HSP است که عمده مود خرابی به صورت پتال به همراه تشکیل پلاگی کوچک بوده است؛ به همین دلیل، جذب انرژی سازه تحت اثر ضربه زننده HSP کمتر از ضربه زننده FLT و بیشتر از ضربه زننده SCN است.

جمع بندی و نتیجه گیری پایانی

در پژوهش حاضر ضربه سرعت بالا بر روی نمونه هدفمند گرادپانی FGM به صورت عددی صورت پذیرفته است. با توجه به اینکه تمام کارهای پیشین صورت گرفته در حوزه بارگذاری ضربه ای بر روی مواد FGM، همگی معطوف به ضربه سرعت پائین و یا ضربه سرعت بالا صرفاً به صورت تجربی بوده اند، در پژوهش حاضر برای نخستین بار، ضربه بالستیک بر روی ماده هدفمند فلز/فلز (متشکل از دو فلز AA5083-H116 و Ti-6Al-4V) به صورت عددی و با استفاده از کدنویسی Python در نرم افزار المان محدود ABAQUS بررسی شد. مراحل مدل سازی به همراه تبیین مدل خرابی جانسون-کوک در بار ضربه ای، بیان شده و صحت سنجی مدل سازی صورت گرفته است. صحت سنجی مدل سازی صورت گرفته با کارهای آزمایشگاهی پیشین نشان از صحت و دقت بالای مدل سازی حاضر است. در ادامه به بررسی پارامترهای مؤثر بر روی ضربه بالستیک بر روی ماده هدفمند پرداخته شده است. اهم نتایج حاصل از این پژوهش را می توان در چند بند زیر خلاصه نمود:

در اینجا بهتر است تا شکل ضربه زننده بعد از خروج از هدف به ازای سه ضربه زننده مختلف بررسی شود که می تواند حاوی نکات مفید باشد. پیش از ارائه این شکل، لازم است تا دو اصطلاح پلاگ (Plug) و پتال (Petal) به عنوان دو مود خرابی قسمتی از ماده هدف جدا نشده، ولی بجای آن در صفحه پشتی هدف به صورت برآمده ظاهر شود، به این حالت پتال گفته می شود. تصاویر خروج ضربه زننده از هدف به ازای دماغه های مختلف در شکل ۱۲ نمایش داده شده است.

نام ضربه زننده	شکل هندسی	مشاهدات
SCN		تشکیل پتال
FLT		تشکیل پلاگ
HSP		تشکیل پتال + تشکیل پلاگ کوچک

شکل ۱۲- تصاویر بعد از خروج ضربه زننده از هدف به ازای دماغه های مختلف

همان طور که از شکل ۱۲ مشخص است، برای نمونه FLT تشکیل پلاگ با اندازه قابل توجه مشاهده شده است؛ درحالی که برای ضربه زننده SCN، پلاگی ایجاد نشده و صرفاً پتال وجود دارد. برای ضربه زننده HSP، علاوه بر تشکیل پتال، یک پلاگ با اندازه کوچک بعد از خروج ضربه زننده وجود دارد.

با جمع بندی تصاویر و توضیحات مربوط به شکل ۱۲ مرتبط با مود خرابی با نتایج حاصل شده از شکل ۱۱ و تفسیر آن

خواص در توزیع خطی در مقایسه سایر توزیع‌ها توجیه شده است.

- عملکرد بالستیک نمونه FGM حتی در شرایط غیر بهینه ($n \neq 1$)، از عملکرد نمونه‌های فلزی خالص لایه‌های بالایی و پایینی به‌تنهایی، بهتر خواهد بود.
- از منظر بررسی اثر شکل دماغه (نوک) ضربه‌زننده بر روی ماده هدفمند گرادایانی، با لحاظ کردن سه نوع مختلف (سر مخروطی، سر کروی و سر تخت) مشاهده شد که جذب انرژی ماده هدفمند گرادایانی در مقابل ضربه‌زننده سر تخت بیشتر از سایر موارد است. با بررسی مشاهدات حاصل‌شده از مدل‌سازی عددی، این‌گونه نتیجه‌گیری شده که در از بین دو مود خرابی عمده در این حالات (تشکیل پتال و تشکیل پلاگ)، تشکیل پلاگ که در واقع یک ناحیه برشی در زیر ضربه‌زننده است، سبب جذب انرژی بیشتری در مقایسه با تشکیل پتال می‌شود. به همین دلیل، ماده هدف در مقابل نفوذ ضربه‌زننده سر تخت که پلاگ بیشتری از سایر ضربه‌زننده‌ها داشت، بالاترین جذب انرژی را دارا بود و در مقابل ضربه‌زننده سر مخروطی که فاقد تشکیل پلاگ بود، کمترین جذب انرژی را داشت.

منابع و مراجع

- [7] M. Aydin and M. K. Apalak, "Experimental damage analysis of Al/SiC functionally graded sandwich plates under ballistic impact", *Mater Sci Eng-A* vol. 671, pp. 107-117, 2016.
- [8] G. Bao, L. Wang, "Multiple cracking in functionally graded ceramic/metal coatings", *Int J Solids Struct*, vol. 32, no. 19, pp. 2853-2871, 1995.
- [9] E. Martínez-Pañeda and R. Gallego, Numerical analysis of quasi-static fracture in functionally graded materials, *Int J Mech Mater Des*, vol. 11, no. 4, pp. 405-424, 2015.
- [10] H. Salavati, H. Mohammadi, A. Yusefi and F. Berto, "Fracture assessment of V-notched specimens with end holes made of tungsten-copper functionally graded material under mode I loading", *Theor Appl Fract Mech*, vol. 97, pp. 357-367, 2017.
- [11] P. Zhu and K. M. Liew, "Free vibration analysis of moderately thick functionally graded plates by local Kriging meshless method," *Compos Struct*, vol. 93, no. 11, pp. 2925-2944, 2011.
- [12] A. A. Khan, M. N. Alam, N. U. Rahman and M. Wajid, "Finite element modelling for static and free

- از مهم‌ترین نتایج حاصل‌شده می‌توان به این نکته اشاره کرد که بر اساس توزیع توانی، در صورتی که توان $n=1$ باشد (توزیع خطی)، بهترین و بهینه‌ترین عملکرد نمونه FGM را تحت ضربه سرعت بالا شاهد خواهیم بود. علت این امر با استفاده از گرادایان ملایم تغییر مشاهده‌شده است که در شرایط مساوی، ماده هدفمند با توزیع خواص بر اساس توزیع سیگموئید (S-FGM) عملکرد بهتری در بارگذاری ضربه‌ای نسبت به حالتی دارد که توزیع خواص بر اساس توزیع توانی (P-FGM) باشد.
- مشاهده‌شده است که در حالتی که در ماده هدفمند گرادایانی بررسی‌شده در این پژوهش، آلیاژ آلومینیوم در لایه بالایی قرار گیرد، جذب انرژی نمونه بیشتر از حالتی است که آلیاژ تیتانیوم در بالاترین سطح نمونه در تماس با ضربه‌زننده باشد.
- از جمع‌بندی نتایج این پژوهش می‌توان بهینه‌ترین حالت ماده FGM فلزی متشکل از دو آلیاژ مورد بررسی (هم از منظر عملکرد بهینه تحت ضربه بالستیک و همچنین از منظر هزینه محاسباتی پایین‌تر) را FGM Al/Ti با $n=1$ و با تعداد ۴۰ زیر لایه معرفی نمود؛ چراکه کمترین سرعت خروجی و به عبارتی بیشترین جذب انرژی را داشته است.

- [1] G. E. Knoppers, J. W. Gunnink, J. V. D. Hout and W. P. V. Vliet, "The reality of functionally graded material products, Intelligent Production Machines and Systems: First I", *PROMS Virtual Conference*, Amsterdam, 467-474, 2005.
- [2] M. B. Bever and P. E. Duwez, "Gradients in composite materials", *Mater Sci Eng*, vol. 10, pp. 1-8, 1972.
- [3] M. Shen and M. B. Bever, "Gradients in polymeric materials", *J Mater Sci*, vol. 7, no. 7, pp. 741-746, 1972.
- [4] B. Kieback, A. Neubrand and H. Riedel, "Processing techniques for functionally graded materials", *Mater Sci Eng*, vol. 362, pp. 81-105, 2003.
- [5] R. M. Mahamood and E. T. Akinlabi, "Types of functionally graded materials and their areas of application, *Functionally Graded Materials*, Springer, pp. 9-21, 2017.
- [6] K. R. Kashyzadeh and A. A. Asfarjani, "Finite element study on the vibration of functionally graded beam with different temperature conditions, *Adv Mater* 5(6) (2016) 57-65.

- ZrO₂ functionally graded materials”, *Ceram Int* 42, pp. 12946-12955, 2016.
- [26] C.-Y. Huang, and Y.-L. Chen, “Design and impact resistant analysis of functionally graded Al₂O₃-ZrO₂ ceramic composite”, *Mater Des*, vol. 91, pp. 294-305, 2016.
- [27] S.-H. Chi and Y.-L. Chung, “Mechanical behavior of functionally graded material plates under transverse load—Part I: Analysis”, *Int J Solids Struct*, vol. 43, pp. 3657-3674, 2006.
- [28] T. Børvik, A. H. Clausen, O. S. Hopperstad and M. Langseth, “Perforation of AA5083-H116 aluminium plates with conical-nose steel projectiles-experimental study”, *Int J Impact Eng*, vol. 30, pp. 367-38, 2004.
- [29] H. K., Sorensen, “ABAQUS 6.14 user’s manuals, dassault systèmes simulia corp.”, *Providence, Rhode Island, USA*, 2014.
- [30] R. L. Donald, “Experimental investigations of material models for Ti-6Al-4V titanium and 2024-T3 aluminum”, Report No. DOT/FAA/AR-00/25”, *National Technical Information Service, Springfield, Virginia*, 2000.
- [31] Y. Zhang, J. C. Outeiro and T. Mabrouki, “On the selection of Johnson-Cook constitutive model parameters for Ti-6Al-4V using three types of numerical models of orthogonal cutting”, *Procedia CIRP* 31 112-117, 2015.
- [32] A. H. Clausen, T. Børvik, O. S. and Hopperstad, A. “Benallal, flow and fracture characteristics of aluminium alloy AA5083-H116 as function of strain rate, temperature and triaxiality”, *Mater Sci Eng*, vol. 364, pp. 260-272, 2004.
- [33] T. Børvik, M. J. Forrestal, O. S. Hopperstad, T. L. and Warren, M. “Langseth, perforation of AA5083-H116 aluminium plates with conical-nose steel projectiles – calculations”, *Int J Impact Eng*, vol. 36, pp. 426-437, 2009.
- [34] H. Li, J. Lambros, B. A. Cheeseman and M. H. Santare, “Experimental investigation of the quasi-static fracture of functionally graded materials”, *Int J Solids Struct*, vol. 37, no. 27, pp. 3715-3732, 2000.
- [35] E. Etemadi, A. A. Khatibi and M. Takaffoli, “3D finite element simulation of sandwich panels with a functionally graded core subjected to low velocity impact”, *Compos Struct*, vol. 89, pp. 28-34, 2009.
- [36] A. Taherkhani, M. Sadighi, A. S. and Vanini, M. Z. Mahmoudabadi, “An experimental study of high-velocity impact on elastic-plastic crushable polyurethane foams”, *Aerospace Science and Technology*, vol. 50, pp. 245-255, 2016.
- vibration response of functionally graded beam,” *Lat Am J Solids Stru*, vol. 13, no. 4, pp. 690-714, 2016.
- [13] A. H. Sofiyev, "The buckling and vibration analysis of coating-FGM-substrate conical shells under hydrostatic pressure with mixed boundary conditions," *Compos Struct* 209, pp. 686-693., 2019.
- [14] B. Qin, R. Zhong, T. Wang, Q. Wang, Y. Xu and Z. Hu, "A unified Fourier series solution for vibration analysis of FG-CNTRC cylindrical, conical shells and annular plates with arbitrary boundary conditions," *Compos Struct* 232, pp. 111549, 2020.
- [15] P. Jiao, Z. Chen, Y. Li, H. Ma and J. Wu, "Dynamic buckling analyses of functionally graded carbon nanotubes reinforced composite (FG-CNTRC) cylindrical shell under axial power-law time-varying displacement load," *Compos Struct* 220, pp. 784-797, 2019.
- [16] J. S. Kumar, B. S. Reddy and C. E. Reddy, "Nonlinear bending analysis of functionally graded plates using higher order theory," *Int J Eng Sci Tech*, vol. 3, no. 4, pp. 3010-3022, 2011.
- [17] R. Gunes, M. Aydin, M. K. Apalak and J. N. Reddy, "Experimental and numerical investigations of low velocity impact on functionally graded circular plates," *Compos Part B-Eng*, vol. 59, pp. 21-32, 2014.
- [18] J. E. Jam and Y. Kiani, "Low velocity impact response of functionally graded carbon nanotube reinforced composite beams in thermal environment," *Compos Struct* 132, pp. 35-43., 2015.
- [19] P. Malekzadeh and M. Dehbozorgi, "Low velocity impact analysis of functionally graded carbon nanotubes reinforced composite skew plates," *Compos Struct* 140, pp. 728-748, 2016.
- [20] S. M. R. Khalili, K. Malekzadeh and A. V. Gorgabad, "Low velocity transverse impact response of functionally graded plates with temperature dependent properties," *Compos Struct*, vol. 96, pp. 64-74., 2013.
- [21] Y. Kiani, M. Sadighi, S. J. Salami and M. R. Eslami, "Low velocity impact response of thick FGM beams with general boundary conditions in thermal field", *Compos Struct*, vol. 104, pp. 293-303, 2013.
- [22] H. Singh, B. C. Hazarika and S. Dey, "Low velocity impact responses of functionally graded plates", *Procedia Eng*, vol. 173, pp. 264-270, 2017.
- [23] R. Gunes, I. Ozkes, F. Nair and M. K. Apalak, "Experimental investigation of the low-velocity impact response of sandwich plates with functionally graded core", *J Compos Mater*, vol. 54, no. 24, pp. 3571-3593, 2020.
- [24] M. Übeyli, E. Balci, B. Sarikan, M. K. Öztas, N. Camuscu, R. O. Yildirim and Ö. Keles, "The ballistic performance of SiC-AA7075 functionally graded composite produced by powder metallurgy", *Mater Des*, vol. 56, pp. 31-36, 2014.
- [25] C.-Y. Huang, Y.-L. Chen, "Effect of mechanical properties on the ballistic resistance capability of Al₂O₃-