

Dynamic Behavior of Shot-Peened 3D Composites with Hybrid Foam Core and Nanoparticle Reinforcement under High-Velocity Impact

Reza Hajizadeh Asl¹, Mehdi Yarmohammad Tooski^{1*}, Mohsen Jabbari¹, Laleh Maleknia²

¹ Department of Mechanical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran Iran

² Department of Textile Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran Iran

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Article History

Received: April 19, 2025

Revised: September 06, 2025

Accepted: September 07, 2025

ePublished: October 24, 2025

ABSTRACT

This research delves into the influence of shot peening on the mechanical behavior of three-dimensional metal-polymer-metal composites when subjected to high-velocity impacts. The primary objective was to assess how the compressive residual stresses induced by shot peening contribute to enhancing the mechanical resistance, increasing the ballistic limit, reducing crack propagation rates, and augmenting energy absorption capabilities of these composites. We prepared specimens with varying nanoclay content (0%, 3%, 5%, and 7%) and tested them in two distinct states: shot-peened and unpeened. High-velocity impact tests were executed using a helium gas gun at a consistent impact velocity of 235 meters per second. The results unequivocally demonstrated that shot peening significantly reduced the impact crater diameter, enhanced surface toughness, and mitigated the growth rate of radial cracks. Notably, the 5% nanoclay specimens that underwent shot peening exhibited the most superior performance, recording the smallest impact locus diameter, the highest ballistic limit, and the maximum absorbed energy. Conversely, increasing the nanoclay content to 7% in unpeened specimens led to stress concentration, a reduction in surface toughness, and an accelerated radial crack growth rate. Analysis of the fracture mechanisms revealed that unpeened specimens displayed extensive and irregular radial cracks. In contrast, the shot-peened specimens exhibited shorter and more densified crack networks. Consequently, we propose that shot peening, when combined with a 5% nanoclay concentration, serves as an effective strategy for improving the impact resistance of multi-layered composites against high-velocity projectile threats.

Keywords: High-Velocity Impact, Ballistic Limit, NanoClay, 3D FMLs, Shot Peening

How to cite this article

Hajizadeh Asl R, Yarmohammad Tooski M, Jabbari M, Maleknia L, Dynamic Behavior of Shot-Peened 3D Composites with Hybrid Foam Core and Nanoparticle Reinforcement under High-Velocity Impact. Modares Mechanical Engineering; 2025;25(08):493-504.

*Corresponding author's email: m_yarmohammad@azad.ac.ir

*Corresponding ORCID ID: 0000-0001-9712-5472



Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.



شاپا: ۷۶-۷۹۰۹؛ مهندسی مکانیک مدرس. ۱۴۰۴؛ ۲۵(۰۸): ۴۹۳-۵۰۴

مهندسی مکانیک مدرس

DOI: 10.48311/mme.2025.27736

صفحه اصلی مجله: mme.modares.ac.ir



رفتار دینامیکی کامپوزیت‌های سه‌بعدی ساچمه‌زنی شده با هسته فوم ترکیبی و تقویت شده با نانوذرات تحت ضربه سرعت بالا

رضا حاجی زاده اصل^۱، مهدی یارمحمد توسکی^{۱*} , محسن جباری^۱، لاله ملک نیا^۲

^۱ گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب، تهران

^۲ گروه مهندسی نساجی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران

چکیده

در این پژوهش، تأثیر فرآیند ساچمه‌زنی بر رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های سه‌بعدی فلز-پلیمر-فلز تحت ضربه‌های سرعت بالا بررسی شد. هدف، ارزیابی تنش‌های پسماند فشاری ناشی از ساچمه‌زنی در بهبود مقاومت مکانیکی، افزایش حد بالستیک، کاهش نرخ رشد ترک‌ها و افزایش جذب انرژی بود. نمونه‌ها شامل ۰٪، ۳٪، ۵٪ و ۷٪ نانورس در دو حالت با ساچمه‌زنی و بدون ساچمه‌زنی مورد آزمایش قرار گرفتند. آزمون‌های ضربه سرعت بالا با تفنگ گاز هلیومی در سرعت ۲۳۵ متر بر ثانیه انجام شد. نتایج نشان داد ساچمه‌زنی قطر برخورد را کاهش داده، چقرمگی سطحی را افزایش داده و نرخ رشد ترک‌های شعاعی را کاهش می‌دهد. نمونه‌های ۵٪ نانورس با ساچمه‌زنی بهترین عملکرد را نشان دادند، کمترین قطر محل برخورد، بالاترین حد بالستیک و بیشترین انرژی جذب‌شده را ثبت کردند. در مقابل، افزایش ۷٪ نانورس بدون ساچمه‌زنی باعث تمرکز تنش، کاهش چقرمگی سطحی و افزایش نرخ رشد ترک‌ها شد. تحلیل مکانیزم‌های شکست نشان داد که در نمونه‌های بدون ساچمه‌زنی، ترک‌های شعاعی گسترده و نامنظم بودند، درحالی‌که در نمونه‌های ساچمه‌زنی‌شده، ترک‌ها کوتاه‌تر و متراکم‌تر بودند. در نتیجه، ساچمه‌زنی همراه با ۵٪ نانورس به‌عنوان راهکاری مؤثر برای بهبود مقاومت کامپوزیت‌های چندلایه‌ای در برابر ضربه‌های سرعت بالا پیشنهاد می‌شود.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۳۰

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۱۵

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۶

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۸/۰۲

کلیدواژه‌ها: کامپوزیت‌های سه‌بعدی، ساچمه‌زنی، حد بالستیک، انرژی جذب‌شده، تنش‌های پسماند فشاری، ضربه سرعت بالا

نحوه ارجاع به این مقاله

حاجی زاده اصل رضا، یارمحمد توسکی مهدی، جباری محسن، ملک نیا لاله، رفتار دینامیکی کامپوزیت‌های سه‌بعدی ساچمه‌زنی شده با هسته فوم ترکیبی و تقویت شده با نانوذرات تحت ضربه سرعت بالا، مهندسی مکانیک مدرس. ۱۴۰۴؛ ۲۵(۰۸): ۴۹۳-۵۰۴

*پست الکترونیکی نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m_yarmohammad@azad.ac.ir

*شناسه اِركید نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ۵۴۷۲-۹۷۱۲-۰۰۰۰-۰۰۰۰-۰۰۰۰



Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

۱- مقدمه

مواد کامپوزیتی به دلیل دارا بودن خواص مهندسی منحصر به فرد، از جمله نسبت استحکام ویژه بالا، مقاومت خوردگی ممتاز و ظرفیت جذب انرژی بالا، در چند دهه اخیر به عنوان موادی راهبردی در صنایع پیشرفته از جمله صنایع هوافضا و حمل و نقل سبک مورد توجه ویژه قرار گرفته‌اند. این مشخصات ممتاز، کامپوزیت‌ها را به گزینه‌ای مطلوب برای کاربردهای مهندسی با الزامات استحکام بالا و چگالی پایین تبدیل نموده است. در این میان، ورق‌های کامپوزیت فلزی سه‌بعدی به عنوان نسل پیشرفته‌ای از این مواد، متشکل از یک هسته فوم‌ساختاری قرار گرفته بین دو لایه کامپوزیت فلزی از جایگاه ویژه‌ای برخوردارند. [1-5]

علیرغم مزایای فوق، این سازه‌های پیشرفته در مواجهه با بارگذاری‌های دینامیکی شدید نظیر بارگذاری بالستیک، مستعد انواع مکانیزم‌های خرابی از جمله جدایش بین لایه‌ای، ترک‌خوردگی زمینه و گسیختگی الیاف می‌باشند [6]. این آسیب‌پذیری، بهبود رفتار مکانیکی این مواد تحت شرایط بارگذاری شدید را به یکی از چالش‌های محوری در مهندسی مواد پیشرفته تبدیل نموده است. مطالعات تجربی و عددی متعددی نشان داده‌اند که اصلاح میکروساختار از طریق افزودن نانوذرات رس به زمینه پلیمری و همچنین اعتبار فرآیند ساچمه‌زنی سطحی می‌تواند به صورت همزمان موجب ارتقاء خواص مکانیکی کلی و مقاومت به خرابی این کامپوزیت‌ها گردد. [7] گپی و همکاران [8] و احمدی و همکاران [9] نشان دادند که افزودن نانورس به کامپوزیت‌ها موجب افزایش سختی، استحکام و مقاومت در برابر ترک‌های ناشی از بارگذاری‌های دینامیکی می‌شود. به‌طور خاص، لیو و همکاران [5] دریافتند که نانورس توانسته است مقاومت کامپوزیت‌ها را در برابر برخوردهای با سرعت بالا افزایش دهد و از گسترش ترک‌ها جلوگیری کند. چنگ و همکاران [10] مطالعات نشان می‌دهند که افزودن نانولوله‌های کربنی به زمینه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف کربن، سختی، مقاومت به شکست، و انعطاف‌پذیری کامپوزیت‌ها را بهبود می‌بخشد. در کنار استفاده از الیاف و نانوذرات، ساختارهای هیبریدی نیز در تحقیقات اخیر به‌طور چشم‌گیری مورد توجه قرار گرفته‌اند. به‌ویژه، کامپوزیت‌های هیبریدی کربن-شیشه که ترکیبی از دو نوع الیاف با خواص متفاوت هستند، توانسته‌اند عملکرد بالاتری را در برابر ضربات با سرعت بالا از خود نشان دهند [12]، [11]. پراوین و همکاران [13] در تحقیقی کامپوزیت‌های هیبریدی کربن-شیشه که ترکیبی از دو نوع الیاف با خواص متفاوت را در برابر ضربات با سرعت بالا مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که این ساختارها به‌ویژه در مواجهه با بارهای دینامیکی شدید، قابلیت جذب انرژی بالاتری دارند.

در مطالعات مشابه، سویاما و همکاران [14] نیز اثر نانورس را در کامپوزیت‌های آلومینیوم-اپوکسی تقویت‌شده با الیاف کولار بررسی کردند و به نتایج مشابهی دست یافتند. آن‌ها دریافتند که

افزودن نانورس باعث بهبود ویژگی‌های مقاومتی مواد در برابر برخوردهای با سرعت بالا و به‌طور خاص در رفتار شکست این کامپوزیت‌ها مؤثر است. این تحقیقات تأکید دارند که نانوذرات می‌توانند با افزایش چسبندگی بین زمینه پلیمری و الیاف تقویت‌کننده، موجب کاهش میزان انتشار ترک‌ها و بهبود پایداری ساختار در برابر آسیب‌های ناشی از بارهای دینامیکی شوند. سروبیی و همکاران [15] در تحقیقی بر روی کامپوزیت‌های آلومینیوم-اپوکسی تقویت‌شده با الیاف بازالت و نانورس، بهبود قابل توجهی در رفتار خمشی و مقاومت به ضربه این مواد مشاهده کردند. آن‌ها نشان دادند که نانورس به‌عنوان یک تقویت‌کننده نانومتریک، می‌تواند موجب توزیع یکنواخت بار و کاهش آسیب‌های ناشی از شوک‌های ضربه‌ای شود. این نتایج نشان می‌دهند که نانوذرات می‌توانند به‌عنوان تقویت‌کننده‌های مؤثر در بهبود استحکام کششی، فشاری و دمایی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف طبیعی عمل کنند.

همبزر و همکاران [16] در تحقیق خود رفتار ضربه‌ای مواد مختلف مانند شیشه، کربن و دایناما را مقایسه کرده و نشان دادند که الیاف کربن به‌ویژه در برابر ضربات با سرعت بالا مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهند. علاوه بر این، دایناما نیز عملکرد مناسبی در جذب انرژی و کاهش آسیب در برابر ضربات دارد، اما در مقایسه با الیاف کربن، میزان نفوذ کمتری از خود نشان داد.

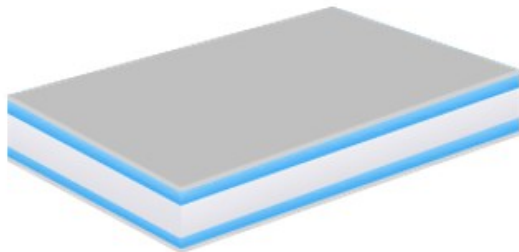
تحقیقات توکل و همکاران [17] بر روی کامپوزیت‌های با هسته‌های فوم پلی‌یورتان نشان داد که این نوع ساختارها می‌توانند به‌طور مؤثری انرژی ضربه‌ای را جذب کرده و از آسیب‌های جدی جلوگیری کنند. این مطالعه تأکید کرد که فوم‌های با چگالی پایین و ساختارهای ساندویچی قادرند در برابر ضربات با سرعت بالا عملکرد مطلوبی داشته باشند. شاهجویی و همکاران [18] در تحقیقی دیگر نشان دادند که استفاده از هسته‌های فومی در ترکیب با الیاف دو بعدی و سه‌بعدی می‌تواند به‌طور چشم‌گیری مقاومت ساختارها در برابر ضربات با سرعت بالا را بهبود بخشد. ساختارهای سه بعدی به دلیل داشتن تداخلات بیشتر در الیاف، توانایی بیشتری در جذب انرژی و جلوگیری از نفوذ دارند.

در زمینه ساختارهای ساندویچی، لی و همکاران [19] به‌طور خاص به تأثیر هسته‌های سلولی سیمی در بهبود مقاومت بالستیکی این ساختارها پرداختند. آن‌ها نشان دادند که این هسته‌های سلولی می‌توانند به‌طور مؤثری ظرفیت جذب انرژی ساختار را افزایش دهند و رفتار ساختار ساندویچی را در برابر ضربات با سرعت بالا بهبود بخشند. وو و همکاران [20] در تحقیق خود نشان دادند که ساچمه زنی توانسته است عمر خستگی آلیاژهای آلومینیوم را افزایش دهد و خواص سطحی آن‌ها را بهبود بخشد. سویاما و همکاران [21] نیز اثبات کردند که این تکنیک می‌تواند تأثیر بسزایی در افزایش مقاومت به ضربه در مواد فلزی داشته باشد. با این حال، تأثیر ساچمه زنی بر رفتار ورق‌های کامپوزیت فلزی سه‌بعدی،

جدول ۱ مشخصات فیزیکی و مکانیکی میکروبالون‌های سرامیکی مورد استفاده در ساختار کامپوزیتی

Table 1 mechanical and Structural properties of ceramic microballoons

Thickness to radius ratio (%)	Outer diameter (μm)	True density (g/cm^3)	Microballoon type
10	170	0.7	WM



شکل ۱ توالی و هندسه کامپوزیت‌های سه بعدی

Fig. 1 Stacking sequence and geometry of the 3D Fiber Metal Laminates (3D FMLs) specimens

پلیمری بر پایه رزین اپوکسی همراه با هاردنر به کار رفته است. رزین اپوکسی ۵۰۶ ML و هاردنر اپوکسی ۱۱ HA از محصولات سری شرکت مواد مهندسی مکرر هستند که بر پایه رزین اپوکسی بیسفنول A و هاردنر پلی آمینی تولید می‌شوند. در ساختار این رزین از نوعی رزین اپوکسی آلیفاتیک استفاده شده که موجب افزایش خواص چقرمگی و انعطاف‌پذیری محصول می‌شود.

به‌منظور بهینه‌سازی چسبندگی بین لایه‌های آلومینیومی و تقویت‌کننده‌های الیافی، عملیات اصلاح سطح با استفاده از اسید سولفوریک ۹۸٪ وزنی، دی‌کرومات پتاسیم و هیدروکسید سدیم انجام گرفت. در ترکیب فوم مورد استفاده، از میکروبالون‌های سرامیکی تأمین‌شده توسط شرکت امگا مینرال با نام تجاری دبلو ام بهره گرفته شد. ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی این میکروبالون‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. برای اصلاح سطح لایه‌های آلومینیوم و الیاف، از ترکیب سه ماده شیمیایی شامل اسید سولفوریک (۹۸ درصد وزنی، H_2SO_4)، دی‌کرومات پتاسیم ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) و هیدروکسید سدیم (NaOH) استفاده شد. اسید سولفوریک با غلظت بالا به‌طور عمده در فرآیند اچ کردن آلومینیوم به کار می‌رود. این فرآیند باعث حذف لایه‌های اکسیدی و ناخالصی‌های سطحی آلومینیوم شده و یک سطح تمیز و فعال ایجاد می‌کند که برای چسبندگی بهتر پوشش‌ها یا مواد پلیمری در مراحل بعدی مناسب است. دی‌کرومات پتاسیم که یک عامل اکسیدکننده قوی است، به همراه اسید سولفوریک استفاده می‌شود و در ایجاد لایه اکسید کروم روی سطح آلومینیوم کمک می‌کند. این لایه اکسید کروم مقاومت آلومینیوم را در برابر خوردگی افزایش می‌دهد و ویژگی‌های مکانیکی سطح را بهبود می‌بخشد. همچنین، هیدروکسید سدیم که یک باز قوی است، برای چربی‌زدایی و

به‌ویژه آن‌هایی که هسته فوم دارند، به‌طور گسترده مورد بررسی قرار نگرفته است. در سال‌های اخیر، ترکیب نانورس و ساچمه زنی به‌عنوان روشی نوین برای بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها مورد توجه قرار گرفته است. فو و همکاران [22] نشان دادند که افزودن نانورس به‌طور همزمان با ساچمه زنی می‌تواند خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها را بهبود بخشد و عملکرد آن‌ها را تحت بارگذاری‌های دینامیکی افزایش دهد. با این حال، مطالعات کمی در خصوص اثرات این دو روش بر رفتار ورق‌های کامپوزیت فلزی سه‌بعدی انجام شده است. زارعی و همکاران [23] رفتار کامپوزیت‌های UHMWPE تحت ضربه سرعت بالا با استفاده از مدل‌سازی اجزای محدود (Abaqus/Explicit) بررسی نمودند. آنها الیاف و زمینه با المان‌های جامد و معیار شکست هاشین (پیاده‌سازی شده با سابروتین VUMAT) مدل‌سازی کردند. نتایج شبیه‌سازی (نمودارهای سرعت و ارزیابی آسیب) با آزمایش‌های تجربی روی پنل‌های ۲۰ و ۴۵ لایه مقایسه شد و تطابق خوبی مشاهده گردید که رویکرد اجزای محدود را برای تحلیل بالستیک این کامپوزیت‌ها تأیید می‌کند.

در این پژوهش منظور از کامپوزیت سه‌بعدی ساختار لایه‌ای خاصی است که از ترکیب فلز، کامپوزیت و فوم به صورت متوالی تشکیل شده است. در این ساختار، ورق‌های فلزی در دو طرف بیرونی قرار گرفته‌اند، لایه‌های کامپوزیتی در کنار فلزات قرار دارند و در مرکز این ساختار، فوم قرار گرفته است. این آرایش منحصر به فرد (فلز-کامپوزیت-فوم-کامپوزیت-فلز) است که به دلیل قرارگیری مواد مختلف در سه لایه مجزا و عملکرد همزمان آنها در سه بعد، آن را به عنوان یک کامپوزیت سه‌بعدی معرفی می‌کند. این ساختار در مقایسه با کامپوزیت‌های معمولی صفحه‌ای، رفتار مکانیکی متفاوتی از خود نشان می‌دهد.

هدف اصلی این تحقیق، بررسی اثرات نانورس و ساچمه زنی بر رفتار ورق‌های کامپوزیت فلزی سه‌بعدی تحت بارگذاری برخورد با سرعت ثابت ۲۳۵ متر بر ثانیه است. این مطالعه به ارزیابی تأثیر این دو عامل بر جذب انرژی، مقاومت به خرابی کامپوزیت‌های سه‌بعدی خواهد پرداخت. همچنین، اثرات ترکیبی این دو روش بر عملکرد مواد در برابر برخوردهای با سرعت بالا مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در هیچ یک از تحقیقات قبلی اثر ساچمه زنی بر کامپوزیت - فلز سه‌بعدی بررسی نگردیده است.

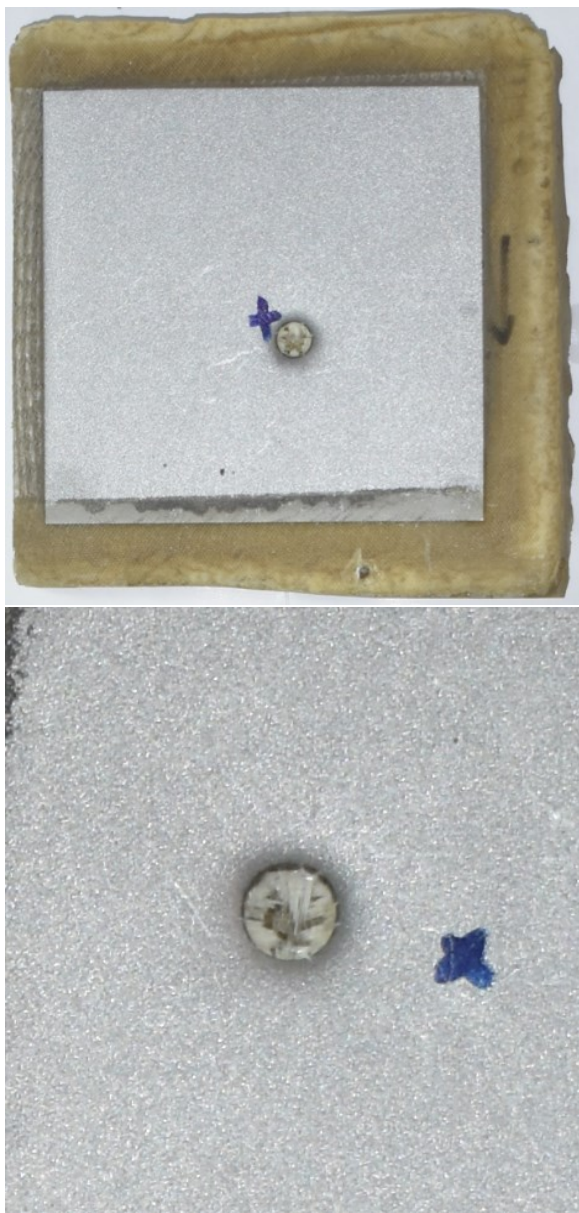
۲- مواد و روش‌های تجربی

۲-۱- مواد اولیه

نمونه‌های مورد بررسی از ترکیب دو ورق آلومینیومی ۲۰۲۴-T3 با ضخامت ۰.۸ میلی‌متر، لایه‌های کامپوزیتی و فوم‌های ساختاری تولید شده‌اند. ساختار لایه‌های کامپوزیتی شامل ۱۲ لایه از الیاف شیشه‌ای نوع E با مشخصه 1200 TEX و آرایش دوبعدی با چگالی ۱۸۰ گرم بر متر مربع بوده که به‌عنوان فاز تقویت‌کننده درون زمینه

در این پژوهش، تأثیر تنش‌های پسماند فشاری ناشی از فرآیند ساچمه‌زنی بر رفتار مکانیکی و ریزساختاری نمونه‌های فلزی بررسی شد. دو دسته نمونه آزمایش شدند: دسته نخست تحت ساچمه‌زنی با شدت برخورد ۱۵۰ متر بر ثانیه قرار گرفتند و دسته دوم به‌عنوان گروه شاهد بدون فرآیند سطحی باقی ماندند. فرآیند ساچمه‌زنی توریینی با ساچمه‌های فولادی استاندارد S230 تحت شرایط کنترل‌شده انجام شد.

برای دستیابی به بیشترین تنش پسماند فشاری در عمق بحرانی و حذف تنش‌های کششی ناخواسته، برخورد ساچمه‌ها عمود بر سطح نمونه‌ها تنظیم شد.



شکل ۳ نمونه ساچمه زنی شده بعد از شلیک

Fig. 3 Analysis of Shotgun Pellet Patterning and Penetration in Post-Firing Ballistic Samples

پاکسازی سطح آلومینیوم و الیاف از آلودگی‌ها، چربی‌ها و روغن‌ها به کار می‌رود. این فرآیند موجب می‌شود که سطح آلومینیوم و الیاف آماده پذیرش مواد پلیمری و پوشش‌های مختلف شود. استفاده از این ترکیب مواد شیمیایی باعث بهبود چسبندگی، افزایش مقاومت به خوردگی و بهبود خواص سطحی برای استفاده در کامپوزیت‌ها و پوشش‌دهی‌های مختلف می‌شود. توالی و هندسه کامپوزیت‌های سه بعدی در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲-۲- ساخت نمونه

در مرحله اول، فوم‌های ترکیبی با کسر حجمی ۲۰٪ میکروبالون درون زمینه اپوکسی، با استفاده از روش اختلاط دستی تولید شدند. با توجه به حساسیت میکروبالون‌ها به خردشدگی مکانیکی، فرآیند ترکیب‌سازی با احتیاط بالا و به وسیله میله چوبی به‌صورت تدریجی و یکنواخت انجام گرفت. مدت زمان ۱۵ دقیقه برای اختلاط در نظر گرفته شد، به‌طوری‌که از تجمع ناهمگن میکروبالون‌ها در زمینه جلوگیری شود. برای بررسی تأثیر تقویت‌کنندگی نانورس در فوم‌های ترکیبی، نمونه‌هایی با سه درصد وزنی مختلف از نانورس در کنار ۲۰٪ حجمی میکروبالون تولید و آماده‌سازی شدند [22], [23].

برای بهینه‌سازی سیستم پلیمری و کاهش ویسکوزیته، رزین اپوکسی پیش‌گرم شده و پس از دستیابی به تعادل دمایی، نانورس با اختلاط مکانیکی و فراصوت به سامانه اضافه گردید تا توزیع یکنواخت و کاهش آگلومراسیون حاصل شود. پس از سرد شدن سیستم و گاززدایی تحت خلأ، میکروبالون‌های سرامیکی افزوده شده و با هم‌زدن ملایم توزیع گردیدند. سپس، عامل پخت (هاردنر) اضافه شده و سامانه به مدت ۴۸ ساعت در قالب فولادی زنگ‌نزن تحت پخت ایزوترمال قرار گرفت. در نهایت، نمونه‌های فومی برش داده شده و بین ۱۲ لایه الیاف شیشه‌ای دوبعدی قرار داده شدند. برای بهبود خواص مکانیکی، استحکام پیوند پوسته-هسته، و بهینه‌سازی ساختار چندلایه‌ای، پرس مکانیکی تحت شرایط هم‌دما به مدت ۲۴ ساعت اعمال شد. کامپوزیت‌های تولیدی توسط فرآیند لایه‌چینی دستی شکل ساخته شدند.



شکل ۲ آماده سازی قطعات به روش HAND LAY UP

Fig. 2 Fabrication of Composite Components via Hand Lay-Up Technique

۲-۳- ساچمه زنی

۴-۲- آزمایش ضربه سرعت بالا

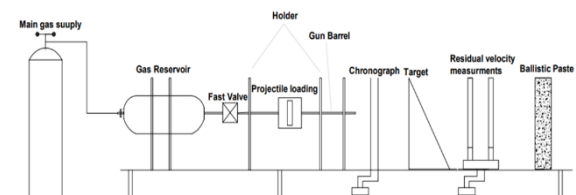
آزمون نفوذ بالستیک با سامانه تفنگ گاز هلیوم فشار بالا در دمای محیط در پژوهشگاه پلیمر انجام شد که قابلیت تولید پرتابه‌هایی با سرعت ۲۳۵ متر بر ثانیه دارد. سرعت پرتابه‌ها توسط کرنوگراف دیجیتال ثبت گردید. کرنوگراف دیجیتال سرعت پرتابه را با اندازه‌گیری دقیق زمان لازم برای عبور پرتابه از دو حسگر نوری با فاصله مشخص محاسبه می‌کند. ابتدا پرتابه حسگر اول را فعال کرده و زمان سنج شروع می‌شود، سپس با عبور از حسگر دوم، زمان سنج متوقف می‌شود. با تقسیم فاصله بین حسگرها بر زمان طی شده، سرعت پرتابه با دقت بالا به دست می‌آید. سامانه شلیک شامل محفظه‌ای با طول ۴ متر، قطر داخلی ۱۰ میلی‌متر، مخزن فشار ۶۰ بار، و شیر برقی واکنش سریع بود که امکان کنترل دقیق شرایط پرتاب فراهم کرد. پرتابه‌های کرووی از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ با قطر ۹ میلی‌متر، جرم ۳ گرم، و سختی ۵۲ راکول سی برای ایجاد شرایط استاندارد بارگذاری ضربه‌ای و تحلیل مکانیزم شکست در کامپوزیت‌های سه‌بعدی انتخاب شدند. نمونه‌های کامپوزیتی درون محفظه‌ای صلب با سطح مقطع ۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر ثابت شدند تا بارگذاری ضربه‌ای یکنواخت تضمین شود. این فرآیند به منظور بررسی مقاومت مکانیکی و مکانیزم شکست در شرایط دینامیکی طراحی شده بود. حد بالستیک نفوذ با استفاده از معادله (۱) محاسبه گردید، و میزان انرژی جذب شده طی فرآیند نفوذ دینامیکی نیز بر اساس رابطه (۲) تعیین شد.

$$V_{BL} = \sqrt{V_t^2 - V_r^2} \text{ for } V_r > 0 \quad (1)$$

$$E_k = \frac{1}{2} m_p V_{BL}^2 \quad (2)$$

نمودار شماتیک دستگاه ضربه با سرعت بالا و تنظیم نمونه در شکل ۴ نشان داده شده است. به منظور بررسی سطح شکست لایه‌های آلومینیوم و هسته کامپوزیت و بررسی تاثیر نانورس بر زمینه اپوکسی، از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی شرکت وگا انجام گرفت.

شرح کدگذاری نمونه‌ها: این سیستم کدگذاری، نمونه‌ها را بر اساس دو عامل اصلی دسته‌بندی می‌کند: اعمال ساچمه‌زنی و درصد نانورس. حرف "الف" به نمونه‌های بدون ساچمه‌زنی و حرف "ب" به نمونه‌های با ساچمه‌زنی اشاره دارد. عدد کنار هر حرف نیز درصد نانورس را مشخص می‌کند (مثلاً ۱ برای ۰٪، ۲ برای ۰.۳٪). این کدگذاری امکان شناسایی سریع و مقایسه نظام‌مند نتایج را بین نمونه‌های مختلف فراهم می‌کند.



شکل ۴ شماتیک سامانه آزمون ضربه بالستیک در سرعت‌های بالا

Fig. 4 Schematic illustration of a high-velocity impact apparatus

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تأثیر فرآیند ساچمه‌زنی بر رفتار مکانیکی نمونه‌ها

فرآیند ساچمه‌زنی با ایجاد تغییر شکل پلاستیک سطحی و القای تنش‌های پسماند فشاری، موجب افزایش چقرمگی سطحی، کاهش تغییر شکل دائمی، و محدود کردن رشد ترک‌های سطحی و زیرسطحی می‌شود. این فرآیند همچنین خواص ریزساختاری و توزیع تنش‌ها را بهبود بخشیده و مقاومت کامپوزیت‌ها در برابر نفوذ پرتابه‌های سرعت بالا را افزایش می‌دهد. نتایج بدست آمده از ضربه سرعت بالا، در جدول ۲ نشان داده شده است. هم چنین سرعت باقی مانده پرتابه و انرژی جذب شده در سرعت ۲۳۵ متر بر ثانیه در اشکال ۵ تا ۷ نشان داده شده است.

کاهش سرعت باقی‌مانده پرتابه نشان‌دهنده افزایش ظرفیت جذب انرژی و مقاومت کامپوزیت در برابر نفوذ است. انتقال انرژی جنبشی از طریق تغییر شکل، شکست بین‌لایه‌ای، و جذب تنش‌ها صورت می‌گیرد و کامپوزیت‌هایی که انرژی بیشتری مستهلک می‌کنند، عملکرد بالستیک بهتری دارند. در نمونه‌های بدون ساچمه‌زنی مشاهده می‌شود که افزایش نانورس از ۰٪ به ۳٪ موجب کاهش سرعت باقی‌مانده از ۱۳۸/۹ متر بر ثانیه به ۱۱۲/۹ متر بر ثانیه شده است. این کاهش را می‌توان به افزایش مدول الاستیک و استحکام مکانیکی زمینه اپوکسی ناشی از پراکندگی ذرات نانورس نسبت داد.

با افزایش مقدار نانورس به ۷٪، مقدار سرعت باقی‌مانده به ۱۲۹/۱ متر بر ثانیه افزایش یافته است. این افزایش را می‌توان ناشی از تمرکز تنش و افزایش شکنندگی زمینه پلیمری در اثر تجمع بیش‌ازحد نانوذرات دانست. در این حالت، رشد سریع‌تر ترک‌ها و کاهش توانایی ماده در جذب انرژی، منجر به عملکرد ضعیف‌تر نسبت به الف شده است.

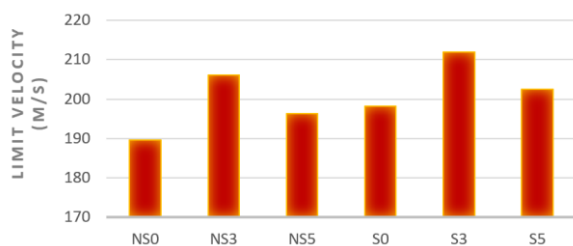
در نمونه‌های ساچمه‌زنی‌شده کاهش چشم‌گیری در سرعت باقی‌مانده پرتابه مشاهده می‌شود. این کاهش را می‌توان به توزیع مجدد تنش‌ها در سطح کامپوزیت و افزایش چقرمگی مکانیکی سطحی ناشی از القای تنش‌های پسماند فشاری در فرآیند ساچمه‌زنی نسبت داد.

نمونه ساچمه‌زنی‌شده با ۵٪ نانورس کمترین مقدار سرعت باقی‌مانده (۱۰۱/۳ متر بر ثانیه) را در بین تمامی نمونه‌ها نشان داد. این مقدار بیانگر حداکثر توانایی جذب انرژی کامپوزیت و توزیع بهینه تنش‌ها در ساختار کامپوزیتی است. مقایسه بین الف و ب نشان می‌دهد که اعمال ساچمه‌زنی موجب کاهش سرعت باقی‌مانده از ۱۳۸/۹ متر بر ثانیه به ۱۲۶/۳ متر بر ثانیه شده است، که این کاهش نشان‌دهنده بهبود عملکرد جذب انرژی ناشی از افزایش چقرمگی سطحی و کاهش رشد ترک‌های سطحی است.

جدول ۲ نتایج ضربه سرعت بالا بر نمونه‌های کامپوزیتی سبده‌ای: اثر ساچمه‌زنی و نانورس

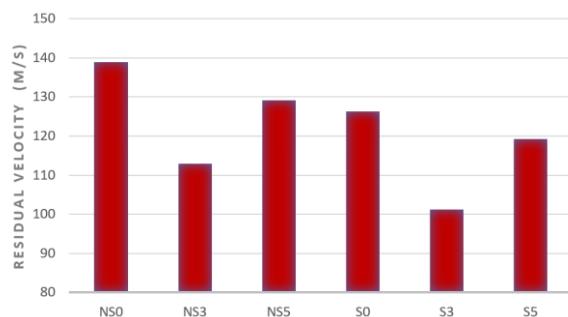
Table 2 Findings derived from the high-velocity impact assessment of 3D FMLs

code	Residual velocity (m/s)	Limit velocity (m/s)	Absorbed energy (J)
A1(No shot blasting 0% nanoclay 0%)	137.4	190.6	54.5
A2(No shot blasting 3% nanoclay%)	114.1	205.4	63.3
A3(No shot blasting 7% nanoclay)	130.1	195.7	57.4
B1(With shot blasting, 0% nanoclay 0%)	124.9	199.1	59.4
B2(With shot blasting, 3% nanoclay 3%)	102.1	211.7	67.2
B3(With shot blasting, 7% nanoclay)	118.4	203.0	61.8



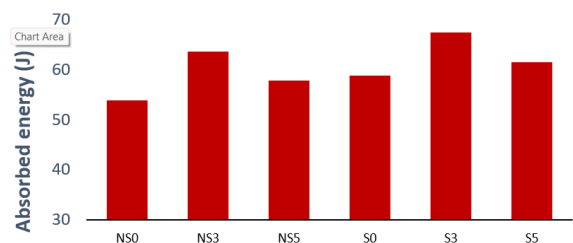
شکل ۵ نتایج حد بالستیک در ضربه سرعت بالا بر کامپوزیت‌های سبده‌ای با و بدون ساچمه‌زنی

Fig. 5 Comparison of ballistic limit velocities for 3D composites in the baseline and shot-peened conditions



شکل ۶ نتایج سرعت باقی‌مانده در ضربه سرعت بالا بر نمونه‌های ساچمه‌زنی‌شده و بدون ساچمه‌زنی

Fig. 6 Post-impact residual velocities of shot-peened and unshot-peened targets



شکل ۷ انرژی جذب‌شده در ضربه سرعت بالا: مقایسه نمونه‌های ساچمه‌زنی‌شده و بدون ساچمه‌زنی

Fig. 7 The effect of shot peening on the energy absorption capacity of composite targets during high-velocity impact

در نمونه‌های بدون ساچمه‌زنی، افزایش نانورس از ۰٪ به ۳٪ موجب افزایش حد بالستیک از ۱۸۹/۶ متر بر ثانیه به ۲۰۶/۱ متر بر ثانیه شده است. این افزایش را می‌توان به بهبود استحکام مکانیکی و افزایش مدول کشسانی زمینه پلیمری ناشی از حضور نانورس نسبت داد. اما در نمونه الف ۳، مقدار حد بالستیک به ۱۹۶/۴ متر بر ثانیه کاهش یافته است. این کاهش ناشی از افزایش تمرکز تنش‌های داخلی، تشکیل ترک‌های ریز، و افزایش شکنندگی کامپوزیت است که منجر به کاهش توانایی آن در متوقف‌سازی پرتابه می‌شود.

در نمونه‌های ساچمه‌زنی‌شده، مقدار حد بالستیک در تمامی نمونه‌ها افزایش یافت که بیانگر تأثیر مثبت فرآیند اصلاح سطحی در بهبود مقاومت کامپوزیت در برابر نفوذ پرتابه‌های سرعت بالا است. نمونه ساچمه‌زنی‌شده با ۵٪ نانورس بالاترین حد بالستیک (۲۱۲/۰ متر بر ثانیه) را در بین تمامی نمونه‌ها نشان داد، که این مقدار به دلیل اثر هم‌افزایی بین تنش‌های پسماند فشاری ناشی از ساچمه‌زنی و بهبود ریزساختاری زمینه در حضور ۵٪ نانورس است. مقایسه بین الف ۱ و ب ۱ نشان می‌دهد که اعمال فرآیند ساچمه‌زنی موجب افزایش حد بالستیک از ۱۸۹/۶ متر بر ثانیه به ۱۹۸/۲ متر بر ثانیه شده است، که این افزایش ناشی از بهبود سختی سطحی، کاهش تمرکز تنش‌های موضعی، و جلوگیری از رشد سریع ترک‌ها است. در نمونه‌های بدون ساچمه‌زنی، افزایش نانورس از ۰٪ (الف ۱) به ۳٪ (الف ۲) باعث افزایش جذب انرژی از ۵۳/۹ ژول به ۶۳/۷ ژول شد که به بهبود سختی زمینه پلیمری و توزیع بهینه تنش‌ها نسبت داده می‌شود.

در نمونه الف ۳ (با ۷٪ نانورس)، مقدار جذب انرژی به ۵۷/۹ ژول کاهش یافت، که ناشی از تمرکز تنش‌های موضعی و کاهش انعطاف‌پذیری زمینه است. نمونه‌های ساچمه‌زنی‌شده در تمامی موارد جذب انرژی بیشتری نسبت به نمونه‌های بدون ساچمه‌زنی نشان دادند. نمونه ب ۲ (ساچمه‌زنی‌شده با ۵٪ نانورس) بیشترین انرژی جذب‌شده (۶۷/۴ ژول) را ثبت کرد، که نشان‌دهنده اثر هم‌افزایی بین تنش‌های پسماند فشاری ساچمه‌زنی و نانورس در بهبود چقرمگی کامپوزیت است. در نمونه ب ۳ (با ۷٪ نانورس) مقدار جذب انرژی به ۶۱/۵ ژول کاهش یافت که نشان‌دهنده تأثیر منفی تجمع بیش‌ازحد نانوذرات و افزایش شکنندگی زمینه است. تنش‌های پسماند فشاری ناشی از ساچمه‌زنی موجب کاهش نرخ رشد ترک‌ها و افزایش چقرمگی سطحی شده است. افزایش مدول سطحی باعث بهبود توزیع انرژی در لایه‌های کامپوزیتی و کاهش تغییر شکل دائمی شده است. حضور ۵٪ نانورس موجب استحکام‌بخشی زمینه پلیمری بدون افزایش شدید شکنندگی شده است.

۳-۲- تحلیل اثر ساچمه‌زنی بر رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های سه‌بعدی تحت ضربه‌های سرعت بالا

شکل ۸ تا ۱۰ نمونه ضربه خورده از قسمت جلو را برای ۰، ۳، ۵ و ۷ درصد وزنی نانورس قبل و بعد از ساچمه زنی را نشان می‌دهد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که قطر محل برخورد پرتابه در نمونه‌های ساچمه‌زنی شده کاهش یافته است، که نشان‌دهنده افزایش استحکام سطحی و کاهش میزان تغییر شکل دائمی است. در نمونه‌ای که تحت ساچمه‌زنی قرار نگرفته بود (الف)، قطر برخورد ۶/۴۷ میلی‌متر اندازه‌گیری شد که بیانگر بیشترین میزان تخریب ساختاری و کمترین مقاومت مکانیکی در برابر نفوذ است. در مقابل، نمونه‌ای که تحت ساچمه‌زنی قرار گرفته و حاوی ۵٪ نانورس بود (ب)، کمترین قطر برخورد (۴/۳۵ میلی‌متر) را نشان داد که نشان‌دهنده بیشترین مقاومت در برابر نفوذ و کمترین میزان گسترش ترک‌ها است.

در این پژوهش، حد بالستیک نمونه الف برابر ۱۸۹/۶ متر بر ثانیه و نمونه ب برابر ۲۱۲/۰ متر بر ثانیه اندازه‌گیری شد که نشان می‌دهد ساچمه‌زنی موجب افزایش ۱۲ درصدی حد بالستیک شده است. این افزایش، بیانگر بهبود توانایی کامپوزیت در متوقف کردن پرتابه و کاهش میزان آسیب‌دیدگی است.

همچنین، تأثیر ساچمه‌زنی بر انرژی جذب‌شده مورد بررسی قرار گرفت. یکی از معیارهای کلیدی در تحلیل ضربه، مقدار انرژی جنبشی جذب‌شده توسط ماده است، که نشان‌دهنده میزان توانایی کامپوزیت در مستهلک‌سازی انرژی پرتابه است. در نمونه‌های بدون ساچمه‌زنی، بیشترین انرژی جذب‌شده برابر ۶۳/۷ ژول در نمونه الف بود، درحالی‌که در نمونه‌های ساچمه‌زنی شده، بیشترین مقدار انرژی جذب‌شده برابر ۶۷/۴ ژول در نمونه ب اندازه‌گیری شد. این افزایش در انرژی جذب‌شده، نتیجه مستقیم بهبود مقاومت مکانیکی و کاهش تخریب در اثر فرآیند ساچمه‌زنی است. در نمونه‌های ساچمه‌زنی شده، ترک‌های شعاعی کمتر و محدودتر هستند و به لایه‌های زیرین نفوذ نمی‌کنند. این تغییرات باعث بهبود استحکام، مقاومت مکانیکی، و افزایش عملکرد در برابر نفوذ می‌شود. نتایج میکروسکوپی نیز نشان می‌دهد که ساچمه‌زنی توزیع تنش‌ها را بهینه کرده و آسیب‌پذیری ساختار کامپوزیت را کاهش داده است. مقایسه نمونه‌های مختلف نشان داد که در نمونه‌های حاوی ۷٪ نانورس، تأثیر ساچمه‌زنی کمتر از نمونه‌های حاوی ۵٪ نانورس بود. در نمونه ساچمه‌زنی شده با ۷٪ نانورس، قطر برخورد ۵/۲۱ میلی‌متر بود که بیشتر از مقدار ۴/۳۵ میلی‌متر در نمونه ب است. تجمع بیش‌ازحد نانورس باعث تمرکز تنش‌های موضعی و افزایش شکنندگی زمینه پلیمری شده است. این مسئله با افزایش سختی زمینه و کاهش انعطاف‌پذیری آن، نرخ رشد ترک‌ها را افزایش داده و عملکرد کلی ماده را تضعیف کرده است. این یافته‌ها اهمیت انتخاب درصد بهینه نانورس را برای بهبود مقاومت مکانیکی کامپوزیت‌ها نشان می‌دهد.

جمع‌بندی نتایج نشان می‌دهد که فرآیند ساچمه‌زنی به‌طور کلی موجب بهبود قابل‌توجهی در مقاومت مکانیکی کامپوزیت‌های سه‌بعدی در برابر ضربه‌های سرعت بالا شده است. بهینه‌ترین ترکیب در این پژوهش، نمونه ساچمه‌زنی شده با ۵٪ نانورس بود که کمترین قطر برخورد (۴/۳۵ میلی‌متر)، بیشترین حد بالستیک (۲۱۲/۰ متر بر ثانیه) و بیشترین انرژی جذب‌شده (۶۷/۴ ژول) را نشان داد. این نتایج تأکید می‌کند که ترکیب ساچمه‌زنی با مقدار بهینه‌ای از نانورس می‌تواند به‌عنوان یک راهکار کارآمد برای بهبود مقاومت مکانیکی کامپوزیت‌های چندلایه‌ای در برابر ضربه‌های سرعت بالا مورد استفاده قرار گیرد. در مقابل، نمونه‌های بدون ساچمه‌زنی یا دارای مقادیر بالاتر از ۵٪ نانورس، عملکرد ضعیف‌تری در جذب انرژی و کاهش قطر محل برخورد نشان دادند. این موضوع با اثر لایه‌برداری نانورس در زمینه اپوکسی ارتباط دارد، که قبلاً توسط مقالات دیگر ذکر شده است. [24]

۳-۳- تحلیل اثر ساچمه‌زنی بر رفتار ترک‌های ایجادشده در کامپوزیت‌های فلزی سه‌بعدی تحت ضربه‌های سرعت بالا

برای تحلیل ترک‌ها، شکل ۱۱ تا ۱۳ برای ۰، ۳، ۷ درصد وزنی نانورس قبل و بعد از ساچمه زنی را نشان می‌دهد. فرآیند ساچمه‌زنی با ایجاد تنش‌های پسماند فشاری در سطح، مقاومت کامپوزیت‌ها را در برابر رشد ترک‌های ناشی از ضربه افزایش می‌دهد. در کامپوزیت‌های بدون ساچمه‌زنی، ترک‌ها به شکل شعاعی از مرکز برخورد گسترش می‌یابند و در زمینه‌های اپوکسی خالص، این ترک‌ها بلندتر بوده و شکست بیشتر از نوع کششی است. ضعف در پیوند الیاف و زمینه و تمرکز تنش‌ها نیز منجر به کاهش مقاومت مکانیکی و رشد سریع‌تر ترک‌ها می‌شود. این نتایج اهمیت ساچمه‌زنی در بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت را برجسته می‌کند. مشاهدات نشان می‌دهد که در نمونه‌های بدون نانورس، بیشترین طول ترک ثبت شده است، در حالی که در نمونه‌های دارای ۵٪ نانورس، تعداد ترک‌ها بیشتر اما طول آن‌ها کوتاه‌تر است. این بهبود به دلیل افزایش چسبندگی بین الیاف و اپوکسی در اثر حضور نانورس است که مانع رشد سریع ترک‌های طولی شده و آن‌ها را به ترک‌های کوچک‌تر و متعدد تقسیم کرده است. در نمونه‌های دارای ۵٪ نانورس، طول ترک‌ها به ۱.۷۲ میلی‌متر افزایش یافته که نشان‌دهنده اثر منفی تجمع بیش‌ازحد نانورس، تمرکز تنش‌های موضعی و کاهش انعطاف‌پذیری زمینه است. فرآیند ساچمه‌زنی، با ایجاد تنش‌های پسماند فشاری، طول ترک‌ها را کاهش داده و مقاومت به خستگی را افزایش داده است. نمونه‌های ساچمه‌زنی شده دارای ترک‌های کوتاه‌تر و تعداد بیشتری نسبت به نمونه‌های بدون ساچمه‌زنی هستند. در نمونه بدون نانورس، طول ترک‌ها پس از ساچمه‌زنی به ۶.۳۲ میلی‌متر کاهش یافته که هنوز طولانی‌تر از سایر نمونه‌ها است. نمونه ساچمه‌زنی شده با ۵٪ نانورس بهترین عملکرد را داشته و کوتاه‌ترین ترک‌ها را نشان داده

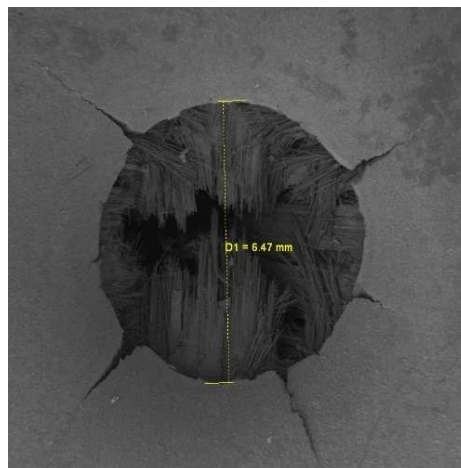
است. در نمونه ساچمه‌زنی‌شده با ۵٪ نانورس، طول ترک‌ها به ۱.۶۰ میلی‌متر کاهش یافته و تعداد ترک‌ها افزایش یافته است. این نشان می‌دهد که تنش‌های فشاری القا شده از رشد ترک‌های شعاعی جلوگیری کرده و باعث توزیع یکنواخت‌تر ترک‌ها شده است. در نمونه دارای ۷٪ نانورس، طول ترک‌ها به ۱.۷۲ میلی‌متر افزایش یافته که به دلیل تجمع بیش‌ازحد نانورس و کاهش انعطاف‌پذیری زمینه، تمرکز تنش‌های موضعی و رشد ترک‌ها را تشدید کرده است. این تفاوت‌ها تأثیر بهینه ۵٪ نانورس و اثر منفی درصد بالاتر آن را بر رفتار مکانیکی کامپوزیت نشان می‌دهد.

در نمونه‌های ساچمه‌زنی‌شده، ترک‌های شعاعی کوتاه‌تر، متراکم‌تر و یکنواخت‌تر توزیع شده‌اند. تنش‌های پسماند فشاری ایجاد شده در سطح، موجب کاهش تنش کششی و کند شدن رشد ترک‌ها شده است. این تنش‌ها همچنین ترک‌های اولیه را بسته و مانع گسترش آن‌ها به عمق ساختار گردیده‌اند. در نتیجه، مقاومت مکانیکی کامپوزیت بهبود یافته و رفتار شکست آن به سمت کنترل‌شده‌تر و پایدارتر تغییر کرده است.

بررسی‌های مکانیکی نشان می‌دهد که در نمونه‌های ساچمه‌زنی‌شده، انرژی جذب‌شده افزایش یافته و حد بالستیک بهبود پیدا کرده است. در نمونه ب-۲، بیشترین مقدار انرژی جذب‌شده برابر ۶۷.۴ ژول اندازه‌گیری شد که نشان‌دهنده بیشترین میزان استحکام مکانیکی و جذب مؤثر انرژی پرتابه است. حد بالستیک نیز در این نمونه ۲۱۲.۰ متر بر ثانیه اندازه‌گیری شد که نسبت به نمونه‌های بدون ساچمه‌زنی افزایش ۱۲ درصدی داشته است. این بهبود عملکرد ناشی از کاهش نرخ رشد ترک، افزایش چقرمگی سطحی، و مهار تخریب پلاستیک در اثر تنش‌های پسماند فشاری است.

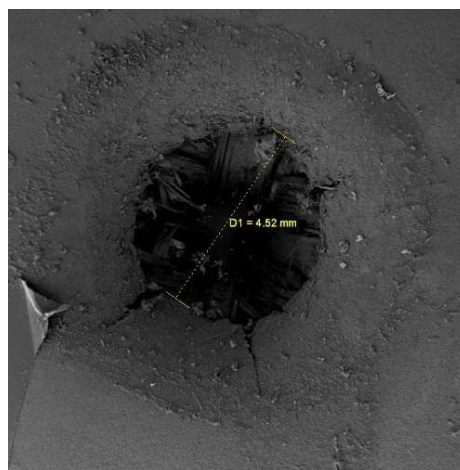
در نمونه‌های بدون ساچمه‌زنی، ترک‌ها به‌صورت شعاعی رشد کرده و طولانی‌تر هستند، درحالی‌که در نمونه‌های ساچمه‌زنی‌شده، توزیع ترک‌ها یکنواخت‌تر و طول آن‌ها کاهش یافته است. کمترین طول ترک در نمونه ساچمه‌زنی‌شده با ۵٪ نانورس (۱.۶۰ میلی‌متر) مشاهده شد که نشان‌دهنده بهترین عملکرد مکانیکی است. افزودن ۵٪ نانورس تأثیر معکوسی بر میزان رشد ترک‌ها داشت و باعث افزایش طول ترک‌ها شد.

حد بالستیک و میزان انرژی جذب‌شده در نمونه‌های ساچمه‌زنی‌شده افزایش یافته و بهبود قابل‌توجهی در مقاومت به ضربه دیده شد. ترکیب ساچمه‌زنی و ۵٪ نانورس، بهترین شرایط را برای افزایش استحکام مکانیکی کامپوزیت‌های فلزی سب‌بندی فراهم کرده و می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مؤثر در افزایش عمر خستگی و مقاومت به ضربه این ساختارها مورد استفاده قرار گیرد.



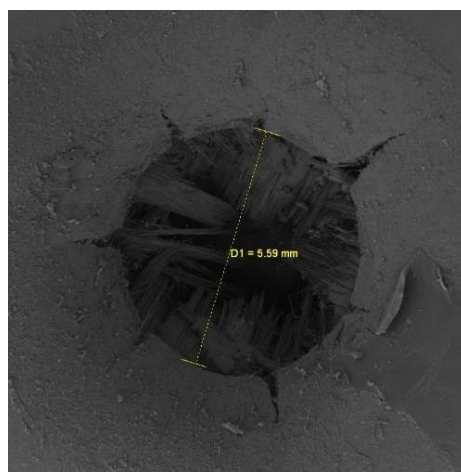
شکل ۸ قطر محل برخورد پرتابه در نمونه بدون ساچمه‌زنی و بدون نانو رس در تصویربرداری میکروسکوپی

Fig. 8 Microscopic analysis of the projectile impact site: Diameter measurement for the baseline sample (unpeened, without nanoclay)



شکل ۹ قطر محل برخورد پرتابه در نمونه بدون ساچمه‌زنی و حاوی ۳٪ نانو رس در تصویربرداری میکروسکوپی

Fig. 9 Diameter of the projectile impact site in the unpeened composite sample with 3% nanoclay reinforcement



شکل ۱۰ قطر محل برخورد پرتابه در نمونه بدون ساچمه‌زنی و حاوی ۵٪ نانو رس در تصویربرداری میکروسکوپی

Fig. 10 Diameter of the projectile impact site for the unpeened composite sample containing 5% nanoclay

یافته‌های این پژوهش در خصوص تأثیر نانورس، تطابق بسیار خوبی با نتایج گزارش شده در مطالعات پیشین نشان می‌دهد. بر اساس نتایج حاصله، افزودن نانورس و ساچمه زنی به زمینه تا میزان ۳ درصد وزنی منجر به افزایش تقریباً ۱۵ درصدی در مقاومت بالستیکی گردید. این میزان بهبود عملکرد، با گزارش‌های لیاقت [9]، سویاما [14] و سرویبی [15] که افزایش مقاومت در بازه ۸ تا ۱۲ درصد را در غلظت‌های مشابه و بدون ساچمه زنی انجام شده ذکر کرده‌اند، همخوانی دارد.

با این حال، افزایش غلظت نانورس فراتر از ۵ درصد وزنی موجب افت خواص مکانیکی شده است، که این رفتار را می‌توان ناشی از پدیده تجمع ذرات نانومتری دانست. این کاهش عملکرد با تحقیقات ذکر شده، هم‌راستا بوده و بیانگر آن است که پس از عبور از این حد بحرانی، تمایل ذرات به کلوخه شدن افزایش یافته و در نتیجه، نقاط تمرکز تنش در ساختار ایجاد می‌شود.

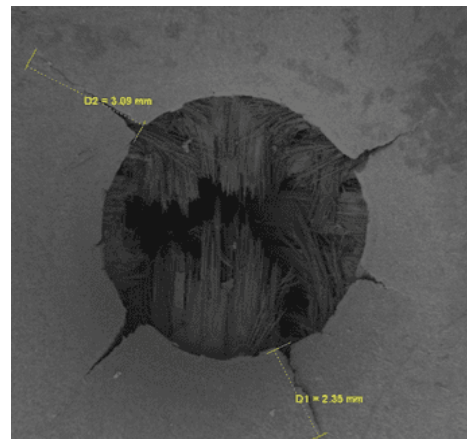
این تطابق میان نتایج پژوهش حاضر و مطالعات معتبر پیشین، بر قابلیت تکرارپذیری و تعمیم‌پذیری آن‌ها در شرایط متنوع نیز دلالت دارد. تفاوت‌های جزئی در میزان بهبود مشاهده شده در منابع مختلف، احتمالاً به عواملی نظیر روش‌های متفاوت در تهیه نمونه‌ها، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نانورس مصرفی، یا شرایط دقیق آزمایشگاهی مرتبط است.

۴- نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که فرآیند ساچمه‌زنی یک روش مؤثر برای بهبود رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های سه‌بعدی فلز-پلیمر-فلز تحت ضربه‌های سرعت بالا است. این فرآیند با القای تنش‌های پسماند فشاری در سطح نمونه‌ها، باعث افزایش استحکام مکانیکی، کاهش نرخ رشد ترک‌ها، و بهبود ظرفیت جذب انرژی در این مواد شده است. بررسی آزمایش‌های انجام شده نشان داد که نمونه‌های ساچمه‌زنی شده، نسبت به نمونه‌های بدون ساچمه‌زنی، عملکرد مکانیکی بهتری از خود نشان داده و حد بالستیک بالاتری را ثبت کرده‌اند.

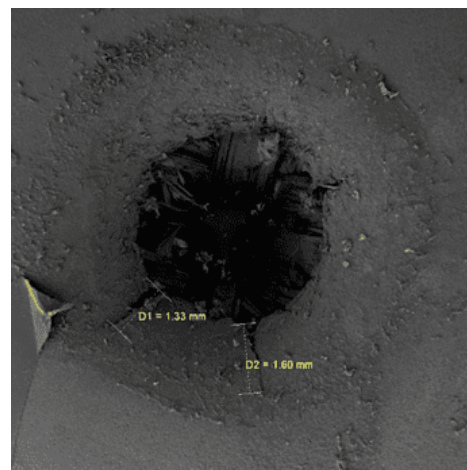
یکی از مهم‌ترین یافته‌های این پژوهش، تأثیر هم‌افزایی ساچمه‌زنی و نانورس بر بهبود رفتار شکست کامپوزیت‌ها است. در حالی که افزودن ۵٪ نانورس موجب افزایش چقرمگی و کاهش نرخ رشد ترک‌ها شد، افزایش مقدار نانورس به ۷٪ باعث کاهش انعطاف‌پذیری زمینه پلیمری و افزایش تمرکز تنش‌ها شد که در نهایت به افزایش شکنندگی و کاهش مقاومت مکانیکی منجر شد. باین‌حال، در نمونه‌های ساچمه‌زنی شده با ۵٪ نانورس، بیشترین حد بالستیک ۲۱۲.۰ متر بر ثانیه و کمترین میزان قطر برخورد ۴.۳۵ میلی متر ثبت شد، که نشان‌دهنده بهترین عملکرد مکانیکی در بین تمامی نمونه‌ها است.

مقایسه حد بالستیک و سرعت باقی‌مانده پرتابه در نمونه‌های مختلف نشان داد که در نمونه‌های بدون ساچمه‌زنی، افزایش



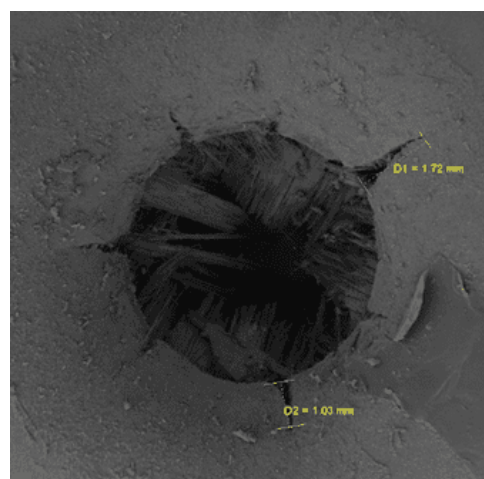
شکل ۱۱ طول ترک‌ها در نمونه بدون ساچمه‌زنی و بدون نانو رس در تصویربرداری میکروسکوپی

Fig. 11 Crack length measured via microscopy in the baseline sample (without shot peening and without nanoclay)



شکل ۱۲ طول ترک‌ها در نمونه بدون ساچمه‌زنی و با ۳٪ نانو رس در تصویربرداری میکروسکوپی

Fig. 12 Crack length measured via microscopy in the sample with 3% nanoclay and without shot peening



شکل ۱۳ طول ترک‌ها در نمونه بدون ساچمه‌زنی و با ۵٪ نانو رس در تصویربرداری میکروسکوپی

Fig. 13 Crack length measured via microscopy in the sample with 5% nanoclay and without shot peening

- syntactic foam core. *Polymer Composites*. 2025. doi: <http://doi.org/10.1002/pc.29926>.
- [3] Fereshteh-Saniee F, Ghorbanhosseini S, Yaghoubi S. A profound study of damage behavior for Al 2024-T3 alloy worksheet produced by constrained groove pressing in the superior practical condition. *Scientific Reports*. 2024;14(1):1-12. doi: <http://doi.org/10.1038/s41598-024-68767-z>.
- [4] Agnieszka S, Kazimierz Z, Krzysztof C, Jakub M. Study on the surface layer properties of magnesium alloys after impulse shot peening. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024;191-204. doi: <http://doi.org/10.1007/s00170-024-14099-1>.
- [5] Sun J, et al. High-velocity impact resistance and energy absorption behavior of Carbon-Kevlar hybrid composite laminates. *Polymer Composites*. 2024;45(1):847-861, doi: <http://doi.org/10.1002/pc.27820>.
- [6] Taherzadeh-Fard A, Khodadadi A, Liaghat G, Yao XF, Mehrizi MAZ. Mechanical properties and energy absorption capacity of chopped fiber reinforced natural rubber. *Composites Part C: Open Access*. 2022 Mar;7:100237. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jcomc.2022.100237>.
- [7] Segurado E, Belzunce FJ, Fernández-Pariente I. Effects of low intensity shot peening treatments applied with different types of shots on the fatigue performance of a high-strength steel. *Surface and Coatings Technology*. 2018;340:25-35. doi: <http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.02.033>.
- [8] Gopi R, Saravanan I, Devaraju A, Loganathan GB. Investigation of shot peening process on stainless steel and its effects for tribological applications. *Materials Today: Proceedings*. 2020;22:580-584. doi: <http://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.215>.
- [9] Ahmadi H, Liaghat G, Charandabi SC. High velocity impact on composite sandwich panels with nano-reinforced syntactic foam core. *Thin-Walled Structures*. 2020;148:106599, doi: <http://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106599>.
- [10] Zhang J, Ju S, Jiang D, Peng HX. Reducing dispersity of mechanical properties of carbon fiber/epoxy composites by introducing multi-walled carbon nanotubes. *Composites Part B: Engineering*. 2013;54:371-376, doi: <http://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.06.035>.
- [11] Hassan ASM, Ghasemi BY. Metallic nanoparticles in polymer composites: Impact performance and structural integrity under dynamic loading. *International Journal of Impact Engineering*. 2023;170:103951, doi: <http://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2022.104365>.
- [12] Wei Q, Yang D, Pan Z. Numerical study on the effects of oblique impact on the ballistic behavior of 3D angle interlock woven fabric. *International Journal of Damage Mechanics*. 2023;32(9):1099-1121, doi: <http://doi.org/10.1177/10567895231187672>.
- [13] Praveen SK, Koteswara Rao S, Damodaram R. Numerical and experimental investigations on the effect of target thickness and solution treatment on the ballistic behaviour of AA7075 thick plates. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2022;236(7):3530-3545. doi: <http://doi.org/10.1177/09544062211038981>.
- [14] Soyama H. Comparison between the improvements made to the fatigue strength of stainless steel by cavitation peening, water jet peening, shot peening and laser peening. *Journal of Materials Processing Technology*.

نانورس تا ۵٪ موجب کاهش قابل‌توجه سرعت باقی‌مانده شد، اما افزایش مقدار نانورس به ۷٪ اثر منفی بر جذب انرژی داشت و منجر به افزایش سرعت باقی‌مانده پرتابه شد. در مقابل، در نمونه‌های ساچمه‌زنی‌شده، تمامی مقادیر سرعت باقی‌مانده کاهش یافت و حد بالستیک افزایش یافت، که این موضوع نشان‌دهنده بهبود توزیع تنش‌ها و افزایش سختی سطحی ناشی از ساچمه‌زنی است. بررسی مکانیزم‌های شکست نشان داد که در نمونه‌های بدون ساچمه‌زنی، ترک‌ها عمدتاً به‌صورت شعاعی و طولانی‌گسترش یافته‌اند، در حالی که در نمونه‌های ساچمه‌زنی‌شده، ترک‌ها کوتاه‌تر و متراکم‌تر شده‌اند. این تغییر رفتار شکست را می‌توان به القای تنش‌های پسماند فشاری در اثر ساچمه‌زنی نسبت داد که موجب کاهش نرخ رشد ترک‌ها و افزایش چقرمگی مکانیکی شده است. همچنین، در نمونه‌های ساچمه‌زنی‌شده، میزان جداشدگی بین‌لایه‌ای کاهش یافته و میزان چسبندگی الیاف به زمینه افزایش یافته است، که این امر موجب افزایش مقاومت کامپوزیت در برابر شکست شده است.

در بررسی میزان انرژی جذب‌شده، مشاهده شد که در تمامی نمونه‌های ساچمه‌زنی‌شده، مقدار جذب انرژی افزایش یافت. نمونه ب‌۲، که ترکیب بهینه‌ای از ساچمه‌زنی و ۵٪ نانورس را دارا بود، بیشترین میزان انرژی جذب‌شده ۶۷.۴ ژول را ثبت کرد. این افزایش ظرفیت جذب انرژی را می‌توان به بهبود سختی زمینه، افزایش مقاومت سطحی، و جلوگیری از گسترش ترک‌های شعاعی در اثر ساچمه‌زنی نسبت داد.

فهرست علائم

V_{BL}	بالستیک سرعت (m/s)
V_i	سرعت اولیه (m/s)
V_r	سرعت باقیمانده (m/s)
m_p	جرم ضربه‌گیر (kg)
E_k	انرژی جذب‌شده (J)

تأییدیه اخلاقی

محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع

تعارض منافعی برای اظهار وجود ندارد.

منابع

- [1] Saleh M, Yarmohammad Tooski M, Khorshidvand AR, Javadi M. Experimental study of the effect of carbon nanotubes and nano-silica on the impact resistance of FML sheets under low velocity Impact. *Functional Composites and Structures*. 2025 Jul;7(3):35001. doi: <http://doi.org/10.1088/2631-6331/ade75a>.
- [2] Asl RH, Tooski MY, Jabbari M, Maleknia L. Dynamic response to high-velocity impact on 3D fiber metal laminates (3D FMLs) incorporating a nano-reinforced

- [21] Soyama H, Chighizola CR, Hill MR. Effect of compressive residual stress introduced by cavitation peening and shot peening on the improvement of fatigue strength of stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*. 2021;288:116877. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116877>.
- [22] Fu Y, Yao X. A review on manufacturing defects and their detection of fiber reinforced resin matrix composites. *Composites Part C: Open Access*. 2022 Jul;8:100276. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jcomc.2022.100276>.
- [23] Zarei H, Shahnazar P, Meskini M, Sarkhosh R. Ballistic performance analysis of ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) composite. *Modares Mechanical Engineering*. 2022 Apr 10;22(5):356-5. doi: <http://doi.org/10.52547/mme.22.5.347>.
- [24] Gupta N, Priya S, Islam R, Ricci W. Characterization of mechanical and electrical properties of epoxy-glass microballoon syntactic composites. *Ferroelectrics*. 2006;345(1):1-12, doi: <http://doi.org/10.1080/00150190601018002>.
- [25] Gupta N, Ye R, Porfiri M. Comparison of tensile and compressive characteristics of vinyl ester/glass microballoon syntactic foams. *Composites Part B: Engineering*. 2010;41(3):236-245, doi: <http://doi.org/10.1016/j.compositesb.2009.10.007>.
- [26] Ebrahimnezhad-Khaljiri H, Eslami-Farsani R, Talebi S. Investigating the High Velocity Impact Behavior of the Laminated Composites of Aluminum/Jute Fibers- Epoxy Containing Nanoclay Particles. *Fibers and Polymers*. 2020;21(11):2607-2613. doi: <http://doi.org/10.1007/s12221-020-1209-6>
- 2019;269:65-78. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.01.030>.
- [15] Serubibi A, et al. Fibre-metal laminate structures: High-velocity impact, penetration, and blast loading – A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2023;173:107674. doi: <http://doi.org/10.1016/j.compositesa.2023.107674>.
- [16] Heimbs S, Wagner T, Viana Lozoya JT, Hoenisch B, Franke F. Comparison of impact behaviour of glass, carbon and Dyneema composites. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2019;233(3):951-966. doi: <http://doi.org/10.1177/0954406218764509>.
- [17] Tavakol MR. Effect of graphene nanoparticles on the strength of sandwich structure inspired by dragonfly wings under low-velocity impact. *Polymer Composites*. 2021:1-16. doi: <http://doi.org/10.1002/pc.26219>.
- [18] Shahjouei S, Barati MR, Tooski MY. High Velocity Impact Response and Damage Mechanism of an Aluminium/Glass-Carbon Fiber/Epoxy Composite Plate Reinforced with Graphene Nano-plates. *Fibers and Polymers*. 2021;22(2):480-488. doi: <http://doi.org/10.1007/s12221-021-0105-z>.
- [19] Li X, Zhang X, Guo Y, Shim VPW, Yang J, Chai GB. Influence of fiber type on the impact response of titanium-based fiber-metal laminates. *International Journal of Impact Engineering*. 2018;114:32-42, doi: <http://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.11.009>.
- [20] Wu J, Liu H, Wei P, Lin Q, Zhou S. Effect of shot peening coverage on residual stress and surface roughness of 18CrNiMo7-6 steel. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2020;183. doi: <http://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105785>.