

# بررسی خواص مکانیکی و بالستیکی نانوزره‌ها

مهران پرهیزکار\*

کارشناس ارشد مهندسی مکانیک  
مرکز تحقیقات بالستیک، ضربه و انفجار  
دانشگاه جامع امام حسین (ع)  
parhizkar67@gmail.com

سید عباس وزیری

استادیار دانشکده مهندسی مواد  
مرکز تحقیقات بالستیک، ضربه و انفجار  
دانشگاه جامع امام حسین (ع)  
vaz\_in@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۹/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۰/۲۰

## چکیده

از جمله کاربردهای نانو مواد، که امروزه در صنایع نظامی به شدت مورد توجه قرار گرفته است، استفاده به عنوان مواد زره است؛ موادی که باید خواص بالستیک و مکانیکی مناسب و توانایی مقاومت در برابر تهدیدهای بالستیک را داشته باشند. در این مقاله، نانوزره‌های مناسب برای تجهیزات نظامی بررسی شده است. این نانوزره‌ها شامل نانوکامپوزیت‌ها و موادی با ساختار نانو می‌باشند. در زمینه مواد با ساختار نانو، فولادهای با ساختار نانو کریستال در کنار یک لایه کامپوزیتی پلاستیکی، خواص بالستیکی و مکانیکی قابل قبولی از خود نشان داده‌اند. در حوزه نانوکامپوزیت‌ها نیز مشاهده شده است که نانوکامپوزیت‌های منیزیم - آلومینا و آلومینیوم - کاربید بور، در نرخ‌های بالای کرنش، خواص مکانیکی قابل توجهی از خود نشان داده‌اند که این امر با کاهش چشمگیر وزن در مقایسه با فولادهای زرهی همراه بوده است. همچنین نتایج مطالعات تجربی نشان داده است که مواد مدرج تابعی<sup>۱</sup> محتوی ذرات فلزی (تیتانیوم) و نانوذرات سرامیکی (تیتانیوم دی‌بورید) استحکام بالایی دارند که به افزایش مقاومت در برابر نفوذ گلوله می‌انجامد.

**واژگان کلیدی:** نانوزره، نانوکامپوزیت‌های فلزی، نانوذرات تقویت‌کننده، خواص مکانیکی، خواص بالستیکی

## ۱. مقدمه

این خواص در نانوزره‌ها، افزودن ذراتی در ابعاد نانو به زمینه است که هر نوع از ذرات متناسب با شکل و خواص مکانیکی بر ویژگی خاصی از نانوزره‌ها اثر می‌گذارند [۱-۴]. براساس مطالعات مشخص شده است که استفاده از نانوتقویت‌کننده‌ها برای افزایش جذب انرژی برخورد (ضربه) بسیار مناسب است [۵]. از این رو صنایع نظامی نیز به این

از جمله کاربردهای نانوکامپوزیت‌های مقاوم در برابر ضربه‌های بالا، زره‌ها می‌باشند. اندازه بسیار کوچک و مقادیر کم نانوذرات این امر را ممکن کرده است. نانوزره‌ها موادی با ساختار نانو و یا نانوکامپوزیت‌هایی هستند که خواصی چون مقاومت به ضربه و حد بالستیک بالا و انعطاف‌پذیری مناسب دارند. یکی از روش‌های رسیدن به



مواد توجه ویژه‌ای داشته و به دنبال طراحی و ساخت تجهیزات نظامی به کمک این مواد هستند؛ زیرا استحکام بالا و وزن پایین، که از مهم‌ترین خواص این مواد به‌شمار می‌روند، در تجهیزات نظامی بسیار اهمیت دارند [۶-۷]. هدف این مقاله، بررسی خواص مکانیکی و بالستیکی مواد با ساختار نانو و نانوکامپوزیت‌های مناسب در صنایع نظامی است که در ساخت نانوزره‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای این منظور، ابتدا انواع نانوزره‌ها و کاربردهای آنها مطالعه و در ادامه به بررسی خواص بالستیکی و مکانیکی آنها پرداخته شده است.

## ۲. انواع نانوزره‌ها

بخشی از نانوزره‌ها که برای تجهیزات نظامی مناسب‌اند، از مواد فلزی، سرامیکی و پلیمری (البته در کنار یکی از مواد سرامیکی یا فلزی) ساخته می‌شوند. این دسته از نانوزره‌ها به‌طور کلی شامل دو بخش می‌باشند؛ بخش اول، نانوزره‌هایی هستند که مواد تشکیل‌دهنده آنها، موادی با ساختار نانو می‌باشند که ساختار نانویی شکل‌گرفته در این مواد، به‌طور مکانیکی ایجاد می‌شود [۸، ۹، ۱۱]. بخش دوم، نانوزره‌هایی هستند که حداقل یکی از اجزای تشکیل‌دهنده آنها در ابعاد نانو می‌باشد. این بخش از نانوزره‌ها همان نانوکامپوزیت‌های با زمینه فلزی یا سرامیکی هستند که به‌کمک نانوذرات تقویت‌کننده، برخی خواص مکانیکی و بالستیکی آنها در مقایسه با زره‌های متداول و سنتی بهبود یافته است [۱۲-۱۳].

## ۳. نانوزره‌های تهیه‌شده از مواد با ساختار نانو

به‌عنوان پیشگام در این زمینه، گلیتر نشان داد که کاهش بیشتر اندازه دانه‌ها تا محدوده نانومتر (کمتر از ۱۰۰ نانومتر) می‌تواند مواد را به‌سوی خواص استثنایی قابل دسترس (مانند استحکام فوق‌العاده)، در دامنه وسیعی از مواد با ساختار نانوکریستال از قبیل فلزات و سرامیک‌ها هدایت کند. چنین بهبودی با کاهش تحرک نابجایی‌ها در دانه‌های

کوچکتر مرتبط است که عمدتاً به‌علت تجمع نابجایی‌ها در مرز دانه‌ها، همچون سد عمل می‌کند و به افزایش تنش تسلیم می‌انجامد. مقاومت بالا در فلزات نانوکریستال از قبیل مس یا فولاد نیز گزارش شده است و جالب آنکه این امر معمولاً در اندازه دانه‌های چند دهم نانومتری به‌دست آمده است؛ زیرا در این ابعاد، انتقال در سازوکار اصلی تغییر شکل رخ می‌دهد [۹].

امروزه مؤثرترین سیستم‌های محافظت شخصی براساس الیاف‌های ترکیبی و کامپوزیت‌ها می‌باشند و برای بهبود خواص آنها به ساختارهای هیبریدی استناد می‌شود. در این ساختارهای ترکیبی، خواص مختلف دو (یا تعداد بیشتری) ماده با یکدیگر ترکیب می‌شود تا سازوکارهای شکست قابل چیره‌شدن بر پرتابه‌های مدرن ایجاد گردد. روش رایج، قراردادن یک صفحه سخت ساخته‌شده از فلز یا سرامیک است (صفحه جلویی) که قادر به تحمل تنش‌های فشاری بالای ایجادشده در حین تماس اولیه باشد و پرتابه‌های نرم‌تر را متلاشی کند. در کنار این ماده سخت، یک ماده الاستیک و دارای استحکام بالا (صفحه پشتی)، تنش‌های کششی بالا، تغییر شکل ایجادشده از خمش و فشار پشتی صفحه را جذب می‌کند. در این زمینه فولادهای با ساختار نانوکریستال<sup>۲</sup> و نانو دوقلویی‌های بسیار ریز کریستالی<sup>۳</sup> خواص مطلوبی برای عملکرد مناسب به‌عنوان صفحه جلویی (با سختی بالا) یا به‌عنوان مواد پشتی (با مقاومت کششی بسیار بالا) دارند [۹، ۱۴].

## ۴. نانوزره‌های تهیه‌شده از مواد در ابعاد نانو

این گروه از نانوزره‌ها، نانوکامپوزیت‌هایی هستند که برخی خواص آنها شامل مقاومت در برابر ضربه و حرارت، حد بالستیک و انعطاف‌پذیری که برای میدان‌های جنگ و محافظت در برابر گلوله‌ها مناسب‌اند، به‌طور قابل ملاحظه‌ای بهبود یافته است. نانوکامپوزیت‌ها موادی هستند که از دو جزء اصلی شامل فاز زمینه و فاز پرکننده (تقویت‌کننده) تشکیل می‌شوند و معمولاً فاز تقویت‌کننده،



ذراتی در ابعاد نانو هستند [۴]. فاز زمینه معمولاً از فلزاتی چون آلومینیوم، منیزیوم و تیتانیوم [۱۰، ۱۱، ۱۵، ۱۷] و فاز تقویت‌کننده از موادی چون تیتانیوم دی‌بورید<sup>۴</sup>، آلومینا<sup>۵</sup>، نانولوله‌های کربنی<sup>۶</sup>، زیرکونیوم دی‌بورید<sup>۷</sup>، کاربید بور<sup>۸</sup>، سولفید تنگستن<sup>۹</sup> و سولفید مولیبدن<sup>۱۰</sup> تشکیل می‌شوند [۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۸].

در مرکز سیستم‌های فلزی و سرامیکی پیشرفته در دانشگاه جان هاپکینز<sup>۱۱</sup> نانوکامپوزیت‌های آلومینیوم - کاربید بور به‌عنوان مواد زرھی مورد آزمون قرار گرفته‌اند و خواص مکانیکی مناسبی از خود نشان داده‌اند [۱۰]. همچنین در مطالعه‌ای دیگر به تولید نانوکامپوزیت‌های آلومینا - تیتانیوم دی‌بورید پرداخته شده است. این نوع نانوکامپوزیت‌ها به‌علت وزن پایین، به‌عنوان مواد مناسب برای ساخت زره‌های سبک مطرح هستند. یکی از روش‌های تهیه این نانوکامپوزیت‌ها، که توسط ربیع‌زاده و همکاران (۲۰۱۲ م) مطالعه شده است، روش آسیاب‌کاری به‌همراه روش سل‌ژل<sup>۱۲</sup> می‌باشد [۱۱]. به این‌صورت که ابتدا به‌کمک روش سل‌ژل ترکیب محتوی اکسید بور<sup>۱۳</sup> (اندازه متوسط ذرات ۲۰ میکرون)، تیتانیوم ایزوپروپوکسید<sup>۱۴</sup> و الکل ایزوپروپیل<sup>۱۵</sup> تهیه و سپس ترکیب حاصل در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد، به‌مدت ۲۴ ساعت خشک شده است. در مرحله آخر این ترکیب با پودر آلومینیوم (با اندازه متوسط ۱۰۰ میکرون) به‌کمک روش آسیاب‌کاری ترکیب شده است. پس از ۳۰ ساعت آسیاب‌کاری مشاهده شد که اثری از ذرات میکرونی آلومینیوم و ترکیب اولیه نیست و نانوکامپوزیت آلومینا - تیتانیوم دی‌بورید به‌دست آمده است [۱۱]. برای کاربردهایی چون وسائل نقلیه زمینی و زرھی، رفتار دینامیکی نانوکامپوزیت‌های منیزیوم به‌منظور ارزیابی استحکام آنها در مقابل بارگذاری‌های دینامیکی که متناسب با برخوردهای تصادفی و ضربه ناشی از اشیاء خارجی است، مورد بررسی قرار گرفته است. در همین زمینه، مطالعاتی در رابطه با رفتار کششی و فشاری دینامیکی نانوکامپوزیت‌های  $Mg/6\%wtAl/0.22\%wtAl_2O_3$  مطالعه شده است. در

مطالعه دیگر، خواص کامپوزیت‌های با زمینه منیزیوم که با ذرات میکرونی آلومینیوم و نانولوله‌های کربنی تقویت شده بود، با نرخ‌های کرنش بالا و پایین مورد بررسی قرار گرفته است [۱۹]. همچنین در یک مطالعه تجربی، خواص کششی دینامیکی نانوکامپوزیت‌های  $AZ31/Al_2O_3$  (AZ31): یکی از آلیاژهای منیزیوم، مطابق جدول ۱) مورد ارزیابی قرار گرفته است و اثر نانوذرات بر استحکام و چکش‌خواری نانوکامپوزیت‌ها در نرخ‌های بالا و پایین کرنش مورد بررسی قرار گرفته است. در تمامی مطالعات تأثیر قابل توجه نانوذرات بر خواص نانوکامپوزیت‌ها مشاهده شده است. در بخش بعد نتایج به‌دست آمده ارائه خواهد شد [۱۶].

جدول ۱. ترکیبات آلیاژ AZ31 منیزیوم [۱۶]

Al	2.8
Zn	0.83
Mn	0.59
Fe	0.0023
Ni	0.0009
Cu	0.001
Si	0.01
Mg	Balance

براساس تحقیقات انجام‌شده، مورد امیدبخش دیگر برای بهبود ظرفیت محافظتی مواد (در اثر بهبود خواص بالستیکی و مکانیکی)، استفاده از مواد مدرج تابعی به‌عنوان مواد زره است. یک ماده مدرج تابعی ساده می‌تواند ترکیبی از کامپوزیت‌ها و نانوکامپوزیت‌های سرامیکی - فلزی باشد که هر لایه ترکیب متفاوتی نسبت به لایه بعدی دارد، به‌طوری‌که هر لایه دارای خواص مکانیکی ساختار کل می‌باشد. به‌عبارت دیگر ماده مدرج تابعی، یک ماده چندفازی است که اجزای اصلی سرامیکی - فلزی آن با یک روند از پیش تعیین‌شده و به‌طور گام به گام تغییر می‌کند و نتیجه آن موادی با خواص مکانیکی متنوع و پایدار می‌باشد. در این مواد، عملکرد محافظتی بالای

سرامیک‌ها می‌تواند با ترکیب شدن با استحکام ساختاری بالای فلزات، راهی برای رسیدن به ترکیب بهینه‌ای از سختی و چکش‌خواری باشد [۱۸].

## ۵. خواص مکانیکی و بالستیکی

در یک مطالعه تجربی فرونتان و همکاران به بررسی خواص بالستیک و میزان تغییر شکل فولاد 304ss و فولاد با ساختار نانوکریستال و نانو دوقلویی‌های بسیار ریز کریستالی پرداختند. جدول ۲ مشخصات نمونه‌های مورد آزمون را نشان می‌دهد [۹]. در این مطالعه تجربی، با نیتريد کردن فولاد با ساختار نانو دوقلویی‌های بسیار ریز کریستالی، فولاد با ساختار نانوکریستال تهیه شده است که در جدول ۲ نیز مشاهده می‌شود. علاوه بر این، در کنار این لایه فولادی، از یک لایه کامپوزیتی (Hexply 8552) متشکل از اپوکسی و الیاف کربن نیز استفاده شده است و همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، برخی از نمونه‌ها به صورت هیبریدی (لایه فولادی و کامپوزیتی) تهیه شده‌اند. نمونه‌های هیبریدی که ضربه به سمت فولادی اعمال شده باشد، با حرف A و نمونه‌هایی که ضربه به سمت کامپوزیتی برخورد کرده باشد، با حرف B مشخص شده‌اند. همه آزمون‌های بالستیک با استفاده از یک اسلحه ساپر، با جلوبرنده گاز هلیم - هوا و گلوله‌های کروی شکل آباری شده ۵/۵۵ میلی‌متری در داخل یک محفظه ضربه انجام شده است. جدول ۳ نتایج آزمون بالستیک شامل حد بالستیک  $V_{50}$ ، انرژی جذب شده و نسبت انرژی جذب شده به چگالی سطحی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، بیشترین حد بالستیک مربوط به هیبرید فولاد درشت‌دانه و لایه کامپوزیتی با زمینه اپوکسی و الیاف کربن (8B) است که در مقایسه با فولاد تنها، حدود ۵۶ درصد افزایش داشته است. از سوی دیگر، نتایج مربوط به چگالی سطحی نشان‌دهنده آن است که نمونه 8B تفاوت زیادی با نمونه‌های 2A، 2B، 6B، 7B، 9B و 10B ندارد، در حالی که جذب انرژی

آن به‌طور قابل ملاحظه‌ای از سایر نمونه‌ها بیشتر است. بر این اساس، نتایج آزمون‌های تجربی نشان می‌دهند که هیبرید فولاد درشت‌دانه و لایه کامپوزیتی انتخابی مناسب برای محافظت بالستیک هستند؛ زیرا هیبرید فوق‌الذکر دارای بالاترین حد بالستیک و جذب انرژی بر واحد وزن می‌باشد. از سوی دیگر، میزان تغییر شکل بالستیک و پلاستیک نمونه‌ها پیش از شکست نیز به‌عنوان یک پارامتر مهم در بحث محافظت بالستیک مطرح می‌باشد؛ زیرا در برخی موارد، زره، پرتابه‌ها را در یک میزانی از درجه تغییر شکل بالستیک - پلاستیک مهار می‌کند که می‌تواند منجر به صدمات جدی شود. مطابق جدول ۴، نتایج آزمون‌های تجربی، تغییر شکل پایین‌تر در هیبریدهای فولاد نانوکریستال و لایه کامپوزیتی با زمینه اپوکسی و الیاف کربن را نشان داده است که می‌تواند آنها را به‌عنوان انتخابی مناسب برای برخی کاربردهای خاص از قبیل جلوگیری از صدمات ناشی از پرتابه‌های با لبه ضخیم مطرح کند. نهایتاً براساس نتایج این مقاله مشخص شد که هیبرید شامل ۲۰ لایه یک میلی‌متری از فولاد نانوکریستال به اندازه هیبرید شامل ۱۰ لایه فولاد درشت‌دانه، جذب انرژی دارد که این امر با ۴۰ درصد تغییر شکل کمتر همراه است [۹]. همچنین، در این مطالعه تجربی نشان داده شد که جهت اصابت گلوله به زره نیز از اهمیت بسیاری برخوردار است؛ زیرا در نمونه‌های هیبریدی متشکل از صفحات فلزی با ساختار نانو و صفحات کامپوزیتی پلیمری، وقتی ضربه به طرف کامپوزیتی برخورد کرده است، جذب انرژی بهتری از نمونه‌هایی که ضربه به طرف فولادی برخورد کرده، مشاهده شده است. این مشاهده به این مطلب اشاره می‌کند که ضربه‌های وارده بر سطح فولادی تمرکز تنش‌های بسیار موضعی را نتیجه می‌دهند، در حالی که ضربه اعمال شده به سمت کامپوزیتی، نیرو را در سطح وسیع‌تری پراکنده می‌کند. همان‌طور که از شکل ۱ مشاهده می‌شود، بخش ب مقاومت بیشتری در مقابل نفوذ گلوله از خود نشان داده و اصطلاحاً دارای شکست ستاره‌ای شکل است،



اما نوع شکست در بخش الف نشان می‌دهد که گلوله در حین آزمون بالستیک سبب سوراخ‌شدن صفحه شده است.

جدول ۲. مشخصات نمونه‌های آزمون بالستیک [۹]

Series	Material 1	Thickness 1	Material 2	Thickness 2
1	304ss	1 mm	-	-
2	304ss	1 mm	Hexply 8552	2 mm (10 layers)
3	-	-	Hexply 8552	2 mm (10 layers)
4	304 SMAT (nt-ufc)	1 mm	-	-
5	304 SMAT+ Nitriding(nc)	1 mm	-	-
6	304 SMAT (nt-ufc)	1 mm	Hexply 8552	2 mm (10 layers)
7	304 SMAT+ Nitriding(nc)	1 mm	Hexply 8552	2 mm (10 layers)
8	304ss	1 mm	Hexply 8552	4 mm (20 layers)
9	304 SMAT (nt-ufc)	1 mm	Hexply 8552	4 mm (20 layers)
10	304 SMAT+ Nitriding(nc)	1 mm	Hexply 8552	4 mm (20 layers)

جدول ۳. نتایج آزمون بالستیک [۹]

Series	$V_{50}$ (m.s <sup>-1</sup> )	Energy (J)	Areal density (kg.m <sup>-2</sup> )	Energy/areal density (J.m <sup>-2</sup> .kg <sup>-1</sup> )
1	350	43	8	5.38
2A	400	56.2	11.16	5.04
2B	440	68	11.16	6.09
3	92.5	3	3.16	0.95
6B,7B	400	56.2	11.16	5.04
8B	545	104.33	13.53	7.71
9B,10B	480	80.93	14.32	5.65

نانو، این مواد به چکش‌خواری قابل توجه و مقاومتهای ویژه فوق‌العاده‌ای تحت نرخهای بسیار بالا از تغییر شکل رسیده‌اند؛ که این خواص در کاربردهای زرهی بسیار حائز

نتایج مطالعات تجربی دیگر نشان داده است که در نتیجه تقویت‌کردن مواد بر پایه آلومینیوم از طریق ایجاد یک ساختار نانوکریستالی و یا افزودن ذرات تقویت‌کننده در ابعاد

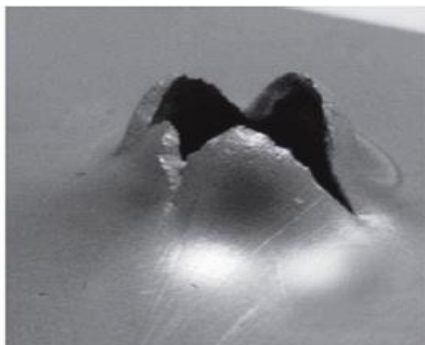


اهمیت و امیدبخش است. در این زمینه، ژانگ و همکاران (۲۰۱۲ م) به بررسی خواص مکانیکی نانومواد بر پایه آلومینیوم و محتوی ذرات کاربرد بور تحت نرخهای کرنش بالا پرداختند [۱۳]. در نتیجه این بررسی تجربی مشخص

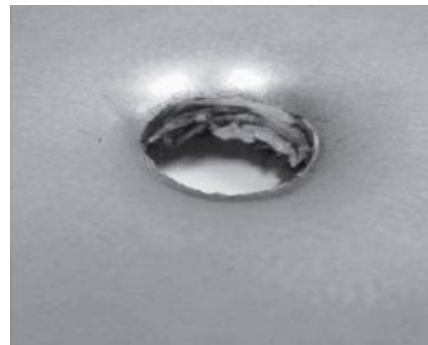
شد وقتی این نانومواد تحت بارگذاری با نرخهای بالای کرنش قرار می‌گیرند، استحکام بسیار بالایی از خود نشان می‌دهند. ضمناً رفتار مکانیکی رایج‌ترین نوع فولاد مناسب برای زره نیز در نرخهای کرنش مشابه بررسی شده است.

جدول ۴. بیشینه تغییر شکل (نتایج تجربی) صفحه فولادی برای نمونه‌ها قبل از شکست [۹]

series	Experimental Deformation (mm)
1	6
4	-
5	-
2B	6
6B,7B	3.5
8B	6
9B,10B	3.5



(ب)



(الف)

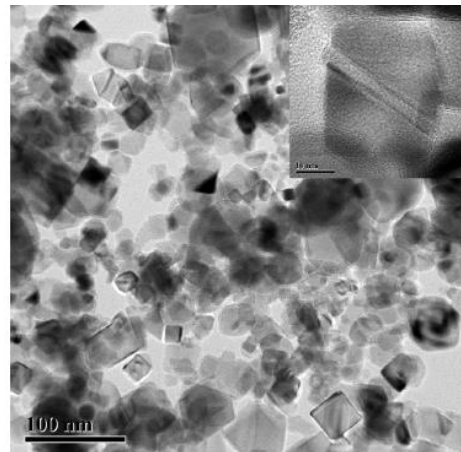
شکل ۱. نوع شکست در صفحات هیبریدی مشکل از فولاد و لایه کامپوزیتی با ضخامت‌های یکسان

(الف) برخورد به سطح فولادی، (ب) برخورد به سطح کامپوزیتی [۹]

توجه به این نکته بسیار حائز اهمیت است که چگالی فولاد مورد نظر تقریباً سه برابر آلیاژهای آلومینیوم است که این مسئله در کاهش وزن زره‌ها بسیار مهم و قابل توجه است. این امر می‌تواند آنها را به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای زره‌های سبک مطرح کند [۱۰]. سرامیک‌های محتوی

تیتانیوم دی‌بورید به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان مواد زره مورد مطالعه قرار گرفته‌اند؛ این امر به‌علت خواص مکانیکی استثنایی آنها تحت شرایط بارگذاری مختلف می‌باشد. در یکی از همین مطالعات، دمیرسکی و همکاران (۲۰۱۴ م) به بررسی خواص مکانیکی سرامیک‌های نانوکریستالی با

استحکام بالای متشکل از ذرات تیتانیوم دی‌بورید و تیتانیوم نیتريد<sup>۱۶</sup>، که به کمک روش ترکیب کردن ماکروویو<sup>۱۷</sup> تهیه شده‌اند، پرداختند. شکل ۲ ریزساختار (تصاویر TEM) یکی از ترکیبات را نشان می‌دهد که محتوی ۵۰ درصد وزنی تیتانیوم دی‌بورید و ۵۰ درصد وزنی تیتانیوم نیتريد است. این شکل نشان‌دهنده وجود ساختار نانو (دانه‌های با اندازه کمتر از ۱۰۰ نانومتر) در سرامیک است [۱۲].



شکل ۲. تصاویر TEM از سرامیک محتوی پودرهای تیتانیوم دی‌بورید (۵۰٪ وزنی) و تیتانیوم نیتريد (۵۰٪ وزنی) [۱۲]

جدول ۵ شرایط تهیه و نتایج آزمون‌های مکانیکی شامل سختی، چقرمگی<sup>۱۸</sup>، مدول الاستیک و استحکام خمشی را برای ترکیبات مختلف از سرامیک‌های  $TiB_2-TiN$  نشان می‌دهد [۱۲]. در نتیجه این مطالعه تجربی و همان‌طور که از جدول ۵ قابل مشاهده است، در ترکیب محتوی ۳۶ درصد وزنی تیتانیوم دی‌بورید و ۶۴ درصد وزنی تیتانیوم نیتريد بهترین تعادل در خواص مکانیکی مشاهده می‌شود. تراکم بالای این سرامیک و ساختار ریز دانه آن که به کمک فرایند ترکیب کردن ماکرو ویو و در دمای ۱۶۵۰ درجه سانتی‌گراد به دست آمده است، مهم‌ترین عواملی هستند که منجر به بهبود خواص مکانیکی آن شده‌اند [۱۲]. در یک مطالعه تجربی دیگر، ژانگ و همکاران به بررسی خواص مکانیکی ترکیب حاصل از سرامیک‌های تیتانیوم دی‌بورید و فلز تیتانیوم پرداختند که به کمک روش ترکیب کردن با

پلاسمای جرقه‌ای<sup>۱۹</sup> تولید شده بودند. در نتیجه این مطالعه مشخص شد که مواد بر پایه تیتانیوم دی‌بورید و محتوی ۲/۵ درصد وزنی فلز تیتانیوم، دارای سختی ۲۶/۸ گیگاپاسکال، استحکام خمشی ۵۵۸ مگاپاسکال و چقرمگی شکست  $5/9 MPa.m^{1/2}$  می‌باشد. به منظور مقایسه بهتر این نتایج با سایر مواد تولید شده بر پایه تیتانیوم دی‌بورید و محتوی تقویت‌کننده‌های دیگر، در جدول ۶ نتایج برخی از مطالعات تجربی دیگر ارائه شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، برای تهیه این سرامیک‌ها از روش‌هایی چون پرس گرم ۲۰، ترکیب با پلاسمای جرقه‌ای و ترکیب با فشار کم<sup>۲۱</sup> استفاده شده است [۱۳]. لازم به ذکر است اعدادی که در بخش جزئیات فرایند مشاهده می‌شوند، به ترتیب بیانگر دما، نرخ حرارت‌دهی و فشار فرایند می‌باشند. در بخش خواص مکانیکی این جدول مشاهده می‌شود که ترکیب  $TiB_2-2.5\%Ti$  در مقایسه با سایر ترکیبات سختی قابل قبولی از خود نشان داده است، این در حالی است که این ترکیب استحکام خمشی و چقرمگی بهتری نیز در مقایسه با سایر ترکیبات دارد. البته در مورد چقرمگی، تنها ترکیب  $TiB_2-0/5\%Cr-0/5\%Fe$  عملکرد بهتری در مقایسه با سایر ترکیبات از خود نشان داده است که می‌تواند به علت چقرمه‌بودن و قابلیت جذب انرژی بالاتر فلز آهن باشد که منجر به افزایش چقرمگی ترکیب مورد نظر شده است. همچنین در جدول ۶ مشاهده می‌شود که ترکیب  $TiB_2-2.5\%Ti$  دارای خواص مکانیکی (سختی و چقرمگی) خوبی است اما این امر تنها شرط لازم برای استفاده از آن به عنوان مواد زره را فراهم می‌کند و شرط کافی برای استفاده از آن به عنوان مواد زره، انجام آزمون بالستیک روی این ترکیب است [۱۳]. در زمینه استفاده از نانوکامپوزیت‌های فلزی به عنوان مواد زره، چو و همکاران (۲۰۸۸ م) به توسعه آلیاژها و نانوکامپوزیت‌های با زمینه منیزیم به منظور استفاده در وسایل نقلیه نظامی زمینی پرداختند [۱۷]. براساس گزارش‌های ارائه شده، منیزیم تقویت شده با نانوذرات، خواص مناسب و بهبود یافته‌ای را در

مقایسه با منیزیوم خالص و سایر آلیاژهای سنتی آن از خود نشان داده است. اگرچه تحقیقات بیشتری لازم است تا اثر نانوذررات بر خواص نانوکامپوزیت‌های بر پایه منیزیوم بهتر مشخص شود، اما تحقیقات اولیه مشخص کرده است که نانوذررات منجر به بهبود خواص کششی منیزیوم شده‌اند. در این مطالعات بهبود قابل ملاحظه‌ای در استحکام تسلیم (۱۴ تا ۱۰۰ درصد) و استحکام نهایی (۷ تا بیش از ۵۰ درصد) مشاهده شده است، در حالی که کرنش شکست معادل قبل و حتی در برخی موارد تا ۱۱۳ درصد بیشتر از آلیاژهای تقویت‌نشده بوده است [۱۷]. در همین زمینه، چن و همکاران (۲۰۱۳ م) به بررسی رفتار کششی دینامیکی و ریزساختار نانوکامپوزیت‌های منیزیوم - آلومینا (با اندازه متوسط ۵۰ نانومتر) پرداخته‌اند [۱۶]. نتایج شکل‌شناسی که به کمک تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی صورت گرفته، توزیع نسبتاً مناسب نانوذررات آلومینا در زمینه منیزیوم و البته در برخی قسمت‌ها، نواحی کلوخه‌ای<sup>۲۲</sup> از نانوذررات را نشان می‌دهد که این امر می‌تواند منجر به افت خواص مکانیکی شود. شکل ۳ نمونه‌ای از این تصاویر را که مربوط به نانوکامپوزیت منیزیوم و ۱/۴ درصد وزنی آلومینا است با بزرگنمایی‌های ۱۰۰۰ و ۴۵۰۰ برابر نشان می‌دهد [۱۶]. نتایج حاصل از آزمون‌های مکانیکی شامل مدول یانگ، استحکام کششی نهایی و کرنش شکست برای نانوکامپوزیت‌های منیزیوم در جدول ۷ ارائه شده

است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نانوکامپوزیت محتوی ۱ درصد وزنی نانوذررات دارای بهترین تعادل در خواص مکانیکی است و با افزایش درصد نانوذررات، افت برخی خواص مکانیکی مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از کلوخه‌ای شدن نانوذررات در زمینه باشد [۱۶]. همان‌طور که در بخش‌های قبل نیز اشاره شد، بررسی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های منیزیوم در نرخ‌های بالای کرنش می‌تواند معیار مناسبی برای بررسی عملکرد آنها در برابر بارگذاری‌های سریع و تصادفی (مانند برخورد گلوله) باشد [۱۹]. از این‌رو در این قسمت خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های AZ31/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> تحت نرخ‌های بالای کرنش مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مطالعه مشاهده شده است که نانوکامپوزیت‌های مختلف در نرخ کرنش ۱/s ۱۲۰۰ رفتار تقریباً مشابهی با هم دارند؛ اما با این‌وجود نانوکامپوزیت محتوی ۳ درصد وزنی آلومینا عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد [۱۶]. همچنین مشاهده شده است که در آلیاژ AZ31 با افزایش نرخ کرنش، مدول کششی کاهش می‌یابد؛ این در حالی است که استحکام تسلیم، استحکام نهایی و چقرمگی افزایش یافته‌اند. نکته قابل توجه این است که رفتاری که در آلیاژ AZ31 حین آزمون کشش با نرخ‌های مختلف مشاهده می‌شود، عیناً در نانوکامپوزیت محتوی ۱/۴ درصد وزنی نانوذررات آلومینا نیز قابل مشاهده است.

جدول ۵. پارامترهای فرایند ترکیب و خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های تیتانیوم دی‌بورید و تیتانیوم نیتريد [۱۲]

Samples	T <sub>mws</sub> <sup>1</sup> (°C)	H.R <sup>2</sup>	H <sub>v</sub> <sup>3</sup> (1GPa)	K <sub>IC</sub> <sup>4</sup> (MPa.m <sup>1/2</sup> )	E <sup>5</sup> (GPa)	B.S <sup>6</sup> (MPa)
TiN	1500	5	18.2±0.3	3.2±0.1	430±8	320±13
36WT% TiB <sub>2</sub>	1650	5	26.2±0.4	6.2±0.34	440±11	368±15
36WT% TiB <sub>2</sub>	1650	20	25.3±0.4	6.0±0.24	435±15	372±13
36WT% TiB <sub>2</sub>	1700	50	24.6±0.3	6.05±0.17	432±12	365±15
50WT% TiB <sub>2</sub>	1700	20	25.6±0.4	5.9±0.11	450±10	380±16
TiB <sub>2</sub>	1700	20	24±0.6	5.58±0.32	480±10	400±17



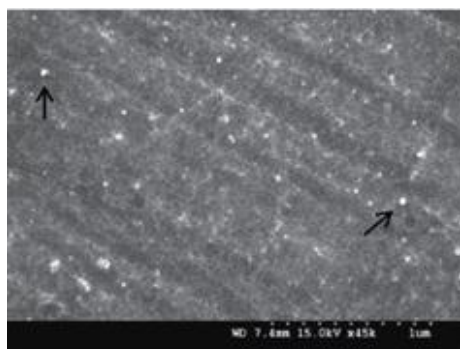


جدول ۶. خواص مکانیکی و پارامترهای فرایندی مربوط به تهیه نانو کامپوزیت‌های تیتانیوم دی‌بورید [۱۳]

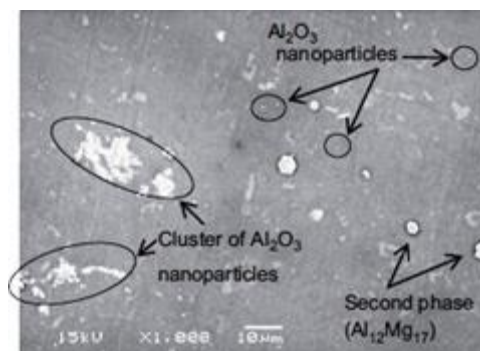
Material composition	Processing details	H <sub>v</sub> <sup>7</sup> (GPa)	F.S <sup>8</sup> (MPa)	Toughness (MPa.m <sup>1/2</sup> )
TiB <sub>2</sub> -2.5%MoSi <sub>2</sub>	HP,1700, 60,30	27.6	391 ±31	-
Monolithic TiB <sub>2</sub>	HP,1650, 60,30	18.3 ±1.2	365 ±89	3.8±0.6
TiB <sub>2</sub> -2.5%TiSi <sub>2</sub>	HP,1650, 60,30	24.8±0.9	380 ±74	4.3±0.3
TiB <sub>2</sub> -5%CrB <sub>2</sub>	HP,1750, 60,35	23.7±1.96	-	4.3±0.4
Monolithic TiB <sub>2</sub>	SPS,1800, 5,50	29.6±2.5	538 ±45	5.2±0.4
TiB <sub>2</sub> -0.5% Cr-0.5%Fe	PS,1800, 120,0	27.0±2.5	506±82	6.2±0.9
TiB <sub>2</sub> -2.5%Ti	SPS,1650, 5,50	26.8±1.6	558±39	5.9±0.3

جدول ۷. نتایج آزمون‌های کشش شبه‌استاتیکی برای آلیاژ AZ31 منیزیم و نانو کامپوزیت‌های آن [۱۶]

Materials	Young's Modulus (GPa)	Yeild Strength (MPa)	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Fracture strength (MPa)
AZ31	40.6±1.7	204.9±10.6	345.3±10.1	13.5±2.3
AZ31/ 1.0Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	43.2±1.5	238.6±4.1	384.8±7.3	19.5±2.6
AZ31/1.4 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	42.9±1.0	231.0±1.4	372.4±8.9	17.4±1.3
AZ31/ 3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	42.1±1.3	245.2±7.5	377.0±12.2	15.8±3.8



(ب)



(الف)

شکل ۳. تصاویر SEM که نشان‌دهنده توزیع نانوذرات در نانو کامپوزیت AZ31/1.4Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> می‌باشد

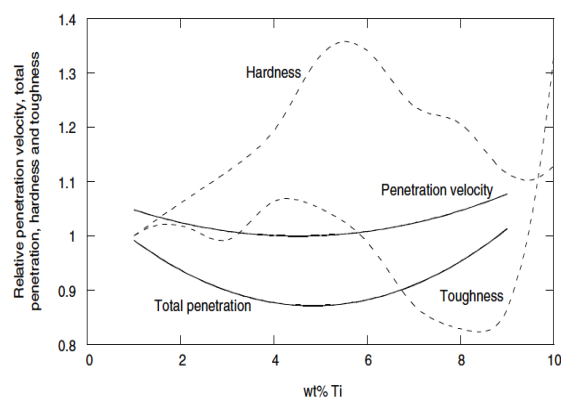
(الف) با بزرگنمایی پایین (۱۰۰۰ برابر)، (ب) بزرگنمایی ۴۵۰۰ برابر (نقاط سفید رنگ نانوذرات آلومینا می‌باشند) [۱۶]

AZ31) در نرخ کرنش ۱/s ۱۲۰۰ شده است؛ ثانیاً رفتار کششی نانو کامپوزیت‌های منیزیم - آلومینا، در نرخ‌های مختلف کرنش مشابه یکدیگر است. اما با این وجود برای

نهایتاً نتایجی که از این تحقیق قابل دریافت است این است که اولاً افزایش درصد نانو ذرات آلومینا منجر به بهبود خواص مکانیکی نانو کامپوزیت بر پایه منیزیم (آلیاژ

تأیید اثر نانوذرات بر خواص بالستیکی نانوکامپوزیت‌های فوق که بر پایهٔ منیزیم هستند، انجام آزمون بالستیکی با سرعت بالا روی آنها ضروری است [۱۶].

در زمینهٔ مواد مدرج تابعی، پیترسون و همکاران (۲۰۵۵ م) به بررسی خواص مکانیکی و بالستیکی کامپوزیت‌های تیتانیوم و تیتانیوم دی‌بورید به‌عنوان مواد مدرج تابعی پرداخته‌اند [۱۸]. نتایج حاصل از آزمون‌های بالستیکی و مکانیکی شامل سرعت نفوذ، عمق نفوذ، سختی و چقرمگی در شکل ۴ ارائه شده است [۱۸]. همان‌طور که از منحنی‌های شکل ۴ مشاهده می‌شود، در نمونه‌هایی که مقدار تیتانیوم موجود در آنها حدود ۵ الی ۶ درصد وزنی است، مقادیر سختی و جذب انرژی بیشینه بوده، عمق و سرعت نفوذ گلوله کمینه است که نشان‌دهندهٔ خواص مناسب این ترکیبات می‌باشد. اما در ادامه و با افزایش مقادیر تیتانیوم تا حدود ۱۰ درصد وزنی و مقادیر بالاتر، افزایش چقرمگی مشاهده می‌شود که می‌تواند به‌علت افزایش فاز فلزی در نانوکامپوزیت باشد [۱۸].



شکل ۴. نتایج آزمون بالستیک و خواص مکانیکی [۱۸]

در تحقیقاتی دیگر مشاهده شده است که موادی از قبیل زیرکونیوم دی‌بورید و SiC به‌عنوان مواد مناسب برای زره به‌کار گرفته شده‌اند. در یک مطالعهٔ تجربی، لیو و همکاران به بررسی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های ZrB<sub>2</sub>-SiC که به روش آلیاژسازی مکانیکی تهیه شده بود، پرداخته‌اند. در نتیجهٔ این تحقیق، در خواص مکانیکی با افزایش درصد

حجمی فاز SiC تا ۲۰ درصد حجمی بهبود مشاهده شده است، به‌طوری‌که بیشترین استحکام خمشی  $100.9 \pm 4.3$  مگاپاسکال و چقرمگی شکست  $6/8 \pm 0/2$  MPa.m<sup>1/2</sup> گزارش شده است؛ این مقادیر بسیار بالاتر از کامپوزیت‌های با زمینهٔ زیرکونیوم دی‌بورید و محتوی ۲۰ درصد حجمی ذرات میکرونی SiC می‌باشند (به‌ترتیب ۴۵۰ مگاپاسکال و  $4/7$  MPa.m<sup>1/2</sup>). این بهبود به این علت است که افزودن SiC به نانوکامپوزیت به شکل‌گیری میکروساختارهایی منجر می‌شود که با جلوگیری از رشد دانه‌ها و تنش‌های پسماند بر روی خواص مکانیکی تأثیر می‌گذارند. البته لازم به توضیح است که برای تأیید خواص بالستیکی این مواد نیز باید آنها تحت آزمون‌های بالستیکی با سرعت بالا قرار گیرند [۲۰].

## ۶. نتیجه‌گیری

مطالعات انجام‌شده مشخص کرد که مواد مناسب برای ساخت نانوزره‌ها شامل دو دسته‌اند: دستهٔ نخست موادی فلزی‌اند که حاوی نانوذرات نمی‌باشند، بلکه با اعمال کار مکانیکی دارای ساختار نانوکریستال می‌شوند و خواص بالستیک نسبتاً خوبی دارند؛ اما برای افزایش بیشتر عملکرد بالستیک این فلزات، آنها را در کنار لایه‌های کامپوزیتی قرار می‌دهند. همچنین در این مواد باید توجه شود که اگر قسمت کامپوزیتی به‌عنوان محل اصابت گلوله یا پرتابه قرار گیرد، عملکرد بالستیک بهتری حاصل می‌شود. در این زمینه نشان داده شد فولاد با ساختار نانوکریستال در کنار یک لایهٔ کامپوزیتی خواص خوب و قابل توجهی از خود نشان داده‌اند. اما دستهٔ دوم ترکیباتی هستند که از دو و یا چند جزء (فاز زمینه و تقویت‌کننده) تشکیل می‌شوند، به‌طوری‌که حداقل یکی از این اجزای تشکیل‌دهنده در ابعاد نانو می‌باشند. در این دسته، از جمله موادی که به‌عنوان فاز زمینه به‌کار گرفته شده‌اند می‌توان به آلومینیوم، منیزیم و تیتانیوم اشاره کرد. در بخش فاز تقویت‌کننده با ابعاد نانو نیز می‌توان به تیتانیوم دی‌بورید، آلومینا، نانولوله‌های کربنی،

زیرکونیوم دی‌بورید، سولفید تنگستن و سولفید مولیبدن اشاره کرد. همچنین نتایج مطالعات مشخص کرد که انجام آزمون بالستیک روی نمونه‌ها برای بررسی خواص بالستیک آنها ضروری است. با این وجود در برخی موارد انجام آزمون‌های کششی و فشاری تحت نرخ‌های بالای کرنش نیز برای ارزیابی اولیه مواد در مقابل ضربه‌های ناشی از اشیای خارجی انجام و مشاهده شده است که نانومواد بر پایه آلومینیوم و محتوی ذرات کاربید بور و نانوکامپوزیت‌های محتوی نانوذرات آلومینا، تحت نرخ‌های کرنش بالا خواص مکانیکی خوب و قابل توجهی از خود نشان داده‌اند. این

نتیجه در حالی حاصل شده است که در این نانومواد، در مقایسه با فولادهای معمولی مناسب برای کاربردهای زرهی کاهش وزن قابل توجهی مشاهده شده است. علاوه بر نانوکامپوزیت‌های تهیه‌شده از این مواد، مشاهده شده است که استفاده از مواد مدرج تابعی نیز می‌تواند به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای حفاظت بالستیک مطرح باشد؛ زیرا در این مواد عملکرد محافظتی بالای نانوذرات سرامیکی می‌تواند با ترکیب‌شدن با استحکام ساختاری بالای فلزات، راهی برای حصول ترکیبی بهینه از سختی و چکش‌خواری باشد.

## ۷. مآخذ

- [1] Poole, C. P., F. J. Owens. *Introduction to nanotechnology*, New Jersey: John Wiley & Sons, 2003.
- [۲] حبیب‌نژاد، مهدی. *نانو مواد (تعاریف، خواص، روش‌های تولید و کاربرد ها)*، فراندیش، چاپ اول، ۱۳۸۶.
- [3] Altmann, J. *Military Nanotechnology potential applications and preventive arms control*, Routledge, 2006.
- [4] Lee, Y. S., E. D. Wetzel, R. G. Egres, N. J. Wagner. "Advanced Body Armor Utilizing Shear Thickening Fluids", *23<sup>rd</sup> Army Science Conference 2002*, Orlando, pp. 29-40.
- [5] Sun, L., R. F. Gibson, F. Gordaninejad, J. Suhr. "Energy absorption capability of nanocomposites: A review." *Composites Science and Technology 2009*, 69, pp. 2392–2409.
- [۶] جوان‌الماسی، محمد، رضا مهرآبادی، طاهره فنایی شیخ‌الاسلامی. "بررسی انواع نانوکامپوزیت‌ها و کاربرد آنها در صنایع دریایی و نظامی"، *اولین همایش ملی توسعه سواحل مکران و اقتدار دریایی جمهوری اسلامی ایران*، ۱۳۹۱.
- [7] Srivastava, A., A. Majumdar. "Improving the impact resistance performance of Kevlar fabrics using silica based shear thickening fluid." *Materials Science and Engineering 2011*, 529, pp. 224-229.
- [8] Avila, A. F., A. S. Neto, H. N. Junior. "Hybrid nanocomposites for mid-range ballistic protection." *International Journal of Impact Engineering 2011*, 38, pp.669-676.
- [9] Frontan, J. "Ballistic performance of nanocrystalline and nanotwinned ultrafine crystal steel." *Acta Materialia 2012*, 60, pp. 1353-1367.
- [10] Zhang, H., J. Ye, S. P. Joshi, J. M. Schoenung. "Superlightweight Nanoengineered Aluminum for Strength under Impact." *Advanced engineering materials 2007*, 9, pp. 153-158.
- [11] Rabieezadeh, A., A. M. Hadian, A. Ataie. "Preparation of alumina/titanium diboride nanocomposite powder by milling assisted sol-gel method." *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials 2013*, 31, pp. 121-124.
- [12] Demirskyi, D., D. Agrawal, A. Ragulya. "Tough ceramics by microwave sintering of nanocrystalline titanium diboride ceramics." *Ceramics International 2014*, 40, pp. 1303-1310.



- [13] Zhang, Zh. H., X. B. Shen, F. C. Wang, S. K. Lee. "Low-temperature densification of TiB<sub>2</sub> ceramic by the spark plasma sintering process with Ti as a sintering aid." *ScriptaMaterialia* 2012, 66, pp. 167-170.
- [14] Mukhopadhyay, A., T. Venkateswaran, B. Basu. "Spark plasma sintering may lead to phase instability and inferior mechanical properties: A case study with TiB<sub>2</sub>." *ScriptaMaterialia* 2013, 69, pp. 159-164.
- [15] Hammond, V. H. *Magnesium Nanocomposites: Current Status and Prospects for Army Applications*, Army Research Laboratory: New York, 2011.
- [16] Chen, Y., Y. B. Guo, M. Gupta, V. P. W. Shim. "Dynamic tensile response of magnesium nanocomposites and the effect of nanoparticles"; *Materials Science & Engineering* 2013, pp. 359-367.
- [17] Cho, K., T. Sano, K. Doherty, Ch. Yen, G. Gazonas. "Magnesium Technology and Manufacturing for Ultra Lightweight Armored Ground Vehicles." *A reprint from the Proceedings of the Army Science Conference* 2008, Orlando, pp. 24-37.
- [18] Pettersson, A., P. Magnusson. "Titanium-titanium diboride composites as part of a gradient armour material," *International Journal of Impact Engineering* 2005, 32, pp. 387-399.
- [19] Habibia, M. K., H. Pouriayevalia, A. M. S. Hamoudab, M. Gupta. "Differentiating the mechanical response of hybridized Mg nano-composites as a function of strain rate." *Materials Science and Engineering* 2012, pp. 51-60.
- [20] Suryanarayana, C., N. Al-Aqeeli. "Mechanically alloyed nanocomposites." *Progress in Materials Science* 2013, 58, pp. 383-502.

## پی‌نوشت

1. Functionally Graded Materials (FGM)
2. Nanocrystalline
3. Nanotwinned Ultrafine Crystal
4. Titanium Diboride (TiB<sub>2</sub>)
5. Aluminium Oxide (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)
6. Carbon Nanotubes (CNT)
7. Zirconium Diboride (ZrB<sub>2</sub>)
8. Boron Carbide (B<sub>4</sub>C)
9. Tungsten(IV) Sulfide (WS<sub>2</sub>)
10. Molybdenum Disulfide (MoS<sub>2</sub>)
11. Johns Hopkins
12. Sol-Gel
13. Boron Oxide
14. Titanium Isopropoxide
15. Isopropyl Alcohol (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O)
16. Titanium Nitride
17. Microwave Sintering
18. Toughness
19. Spark Plasma Sintering

20. Hot Pressing
21. Pressureless Sintering
22. Agglomeration

هیئت تحریریه مجله مهندسی مکانیک از تمامی پژوهشگران، استادان، دانشجویان و صنعتگران ساعی دعوت می‌کند تا دست‌نوشته‌ها و مقاله‌های علمی و گزارش‌های تخصصی خود را به دبیرخانه مجله علمی ترویجی مهندسی مکانیک ارسال کنند و بدین طریق این مجله کهن را در مسیر رشد و شکوفایی بیش از پیش یاری فرمایند.

هیئت تحریریه مجله مهندسی مکانیک

