

فصلنامه علمی-ترویجی پدافند غیرعامل

سال پنجم، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۳، (پیاپی ۲۰): صص ۵۹-۶۹

مقاومسازی زره‌ها با استفاده از نانوفناوری

سید عباس وزیری^۱، سید علی حسینی خراسانی^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۷/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۱/۰۵

چکیده

پدافند غیرعامل به مجموعه اقداماتی اطلاق می‌گردد که در مقابل حملات دشمن و یا بروز حوادث طبیعی، به استفاده از جنگ‌افزار نیاز ندارد و با اجرای آن‌ها می‌توان از وارد شدن خسارات مالی و تلفات انسانی جلوگیری نموده و یا میزان آن را به حداقل ممکن کاهش داد. اقدامات پدافند غیرعامل شامل پوشش، پراکندگی، تفرقه و جابه‌جایی، فریب، اعلام خبر، استحکامات و سازه‌های امن می‌باشد. یکی از اقدامات نظامی پدافند غیرعامل، استحکامات از جمله زره‌ها می‌باشد. با افزایش مقاومت و افزایش کارایی زره‌ها در میدانی جنگ آینده می‌توان از خسارات و تلفات در برابر حملات جلوگیری کرد. نانوزره‌ها، مواد به‌کارگیری شده در زره‌ها هستند که با ساختار این مواد نانو شده است و یا از نانوذرات در ساخت آن‌ها استفاده شده است. با استفاده از نانوفناوری، به مقدار بسیار زیادی می‌توان کارایی زره‌ها در برابر پرتابه‌های سرعت بالا را افزایش داد. در این مقاله، اثرات مطلوب استفاده از نانوفناوری در مقاومسازی زره‌های مختلف منجمله ادوات زرهی و زره‌های انفرادی مورد بررسی قرار گرفته است.

کلیدواژه‌ها: پدافند غیرعامل، نانوزره‌ها، نانوفناوری، مقاومسازی، جذب انرژی

۱- استادیار و عضو هیئت علمی دانشگاه جامع امام حسین (ع) - avaziri@ihu.ac.ir - نویسنده مسئول

۲- کارشناس ارشد نانو مواد، گروه نانو مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۱- مقدمه

پدافند غیرعامل به مجموعه اقداماتی اطلاق می‌گردد که در مقابل حملات دشمن و یا بروز حوادث طبیعی، به استفاده از جنگ‌افزار نیاز ندارد و با اجرای آن‌ها می‌توان از وارد شدن خسارات مالی و تلفات انسانی جلوگیری نموده و یا میزان آن را به حداقل ممکن کاهش داد. اقدامات پدافند غیرعامل شامل پوشش، پراکندگی، تفرقه و جابه‌جایی، فریب، اعلام خبر، استحکامات و سازه‌های امن و مقاوم‌سازی می‌باشد. یکی از اقدامات نظامی در حوزه پدافند غیرعامل، به‌کارگیری استحکامات مقاوم به نفوذ از جمله زره‌ها می‌باشد. با افزایش مقاومت به نفوذ و افزایش کارایی زره‌ها در میادین نبرد می‌توان از خسارات و تلفات در برابر حملات دشمن جلوگیری کرد [۱]. برای این منظور، فولادهای ولدوکس^۱، هاردوکس^۲ و دومکس^۳ برای سال‌های زیادی در صنایع دفاع استفاده شده‌اند. این فولادها مانند آلایزهای آلومینیم و تیتانیم، مقاومت خوبی در برابر پرتابه‌ها فراهم می‌کنند؛ به‌طوری که ترکیبی از استحکام بالا و مقاومت به ضربه بالا از خود نشان می‌دهند [۲]. با این حال، دانسیته جرمی بالای زره‌های فولادی یک پارچه، کاربرد آن‌ها را در ماشین‌های سبک جنگی محدود کرده است. معرفی یک ورقه زرهی لایه‌ای، راهی است که می‌توان با آن ضمن ارتقاء مقاومت به نفوذ، وزن زره را نیز کاهش داد [۳]. البته برای این منظور می‌توان از مواد دیگر نیز بهره برد. به عنوان مثال، مقاومت (در برابر پرتابه) زره‌های ساخته‌شده از آلایز آلومینیم با مقاومت زره‌های فولادی با ضخامت‌های بیشتر، برابر است. سرامیک‌هایی مانند Al_2O_3 ، B_4C ، SiC و TiB_2 نیز مواد متداولی هستند که به خاطر ترکیب سختی بالا و دانسیته پایین جایگزین فولادهای بسیار سنگین می‌شوند [۴-۶].

پیشرفت مهندسی علم مواد، نانو فناوری و مخصوصاً نانو مواد، فرصت‌های زیادی را ایجاد کرده است. اخیراً گزارش شده که سیستم‌های تقویت‌شده با نانو الیاف‌ها که انتظار می‌رود رابطه وزن به محافظت قابل توجهی داشته باشند، نه تنها برای تجهیزات انفرادی بلکه برای قسمت بدنه موتور ماشین‌ها و حتی هواپیماها و نه تنها تحت شرایط جنگی، بلکه به صورت بالقوه در بازارهای مواد بالستیک قابل استفاده‌اند.

فلزات عمدتاً به دلیل خواص تغییر فرم پلاستیک آن‌ها، برای جذب انرژی ضربه استفاده می‌شوند. برخلاف فلزات، مواد کامپوزیتی پلیمری معمولاً تغییر فرم پلاستیک از خود نشان نمی‌دهند، اگرچه رابطه تنش-کرنش آن‌ها مدل‌های مختلفی از رفتار غیر خطی را نشان می‌دهد. یکی از سازوکارهای جذب انرژی در ساختار مواد، جذب داخلی است به طوری که برای کنترل ارتعاش و خستگی بسیار

مهم است و دیگری، چقرمگی شکست می‌باشد که مقدار انرژی مورد نیاز برای رشد ترک و شکستگی است. یکی از کاربردهای جالب و ویژه توسعه محصولات نانویی با مقاومت ضربه بالا، مواد زرهی است که اندازه بسیار کوچک و کسر حجمی کم نانو ذرات، این امر را فراهم کرده است. نانو زره‌ها موادی با ساختار نانو و یا نانو کامپوزیت‌هایی هستند که برخی خواص آن‌ها شامل مقاومت به ضربه زیاد، حد بالستیک بالا و انعطاف‌پذیری مناسب است که برای میدان‌های رزم و محافظت در مقابل پرتابه‌ها مطلوب هستند. یکی از روش‌ها برای رسیدن به خواص فوق‌الذکر در نانو زره‌ها، افزودن ذراتی در ابعاد نانو به زمینه می‌باشد که هر کدام از ذرات، متناسب با شکل، خواص مکانیکی و غیره بر روی ویژگی خاصی از نانو زره‌ها تاثیر می‌گذارند [۷]. بر اساس مطالعات صورت‌گرفته مشخص شده است که استفاده از نانو تقویت‌کننده‌ها برای افزایش جذب انرژی برخورد (ضربه) بسیار مناسب و دارای پتانسیل قابل توجهی است [۸]. از این رو صنایع نظامی نیز به این مواد توجه ویژه‌ای داشته و به دنبال طراحی و ساخت تجهیزات نظامی به کمک این مواد هستند، چرا که استحکام بالا و وزن پایین از مهم‌ترین خواص این مواد به‌شمار می‌رود که در تجهیزات نظامی نیز بسیار حائز اهمیت است.

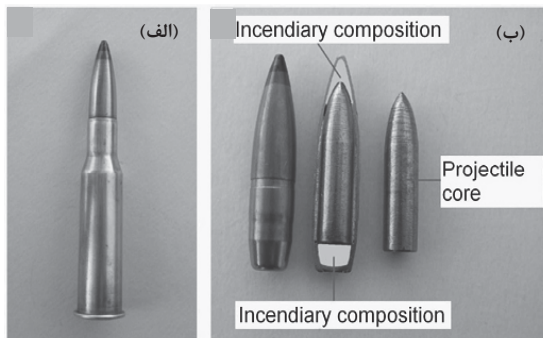
هدف از این تحقیق، بررسی امکان استفاده از نانوفناوری برای مقاوم‌سازی مواد زرهی به عنوان یک سیستم پدافند غیرعامل می‌باشد.

۲- نانوفناوری در زره‌های انفرادی

یکی از نویدبخش‌ترین پیشرفت‌های اخیر در استفاده از مواد پلیمری برای لباس‌های حفاظتی، الیاف ژاپنی Zylon است که دارای استحکام کششی حدود دو برابر کولار و مشابه P-آرامید تجاری می‌باشد. خواص شگفت‌انگیز Zylon، جلیقه‌های فوق سبک و بسیار راحت (و البته بسیار گران‌قیمت!) را ایجاد کرده‌اند. البته تخریب این پلیمر تحت نور مرئی، باعث ایجاد محدودیت‌هایی در به‌کارگیری آن شده است [۹]. به ویژه، با حمله رطوبت و مواد شیمیایی که معمولاً در عرق یافت می‌شود، در طی یک دوره تنها شش ماهه به اندازه ۶۵٪ از استحکام آن کاهش می‌یابد. این محدودیت‌ها، به علاوه قیمت بالا، به‌شدت توسعه این مواد را محدود می‌کند [۱۰]. در زمینه فوق، صنعت زره با یک معمای جالب مواجه است: در دسترس بودن مواد پلیمری بسیار قوی، اما بسیار حساس به شرایط کاری استاندارد. تا کنون راه‌حلی‌هایی پیشنهاد شده و مورد آزمایش قرار گرفته است، من جمله پوشش‌های محافظ تا استفاده از پرتوافکنی برای تغییر تنظیمات مولکولی مواد پلیمری از قبیل HIPS، نایلون، کولار و Zylon که حساسیت کمتری نسبت به در معرض محیط زیست و رطوبت قرار گرفتن، دارند (که هر دو از محیط و به‌ویژه از حامل جلیقه به عنوان مثال عرق) می‌آیند).

1- Weldox
2- Hardox
3- Domex

تنش‌هایی که در طول ضربه به‌وجود می‌آیند از استحکام نهایی زره و هسته فولادی پرتابه فراتر می‌رود. در این مرحله، نوک پرتابه تحت تغییر فرم پلاستیک قرار می‌گیرد و در سطح زره، حفره به‌وجود می‌آید. در مرحله بعد، پرتابه با یک سرعت ثابت در زره نفوذ می‌کند و حفره عمیق‌تر می‌شود. تغییر فرم پلاستیک نوک پرتابه، سطح تماس پرتابه را افزایش داده و مقاومت زره باعث کاهش در سرعت آن می‌شود و در مرحله نهایی ضربه، پرتابه به زره می‌چسبد. انتخاب اشتباه خواص مکانیکی زره و متعاقباً لایه‌های سطحی زره باعث می‌شود که مکانیزم شکست مرحله دوم اتفاق بیفتد و زره سوراخ شود. سختی زره، توانایی کند کردن نوک تیز پرتابه را مشخص می‌کند (شکل ۲) و توزیع انرژی ضربه در یک منطقه وسیع را مطمئن می‌سازد.



شکل ۲- الف) پرتابه آتش زنه سوراخ کننده زره (ب) پرتابه B32 [۱۱]

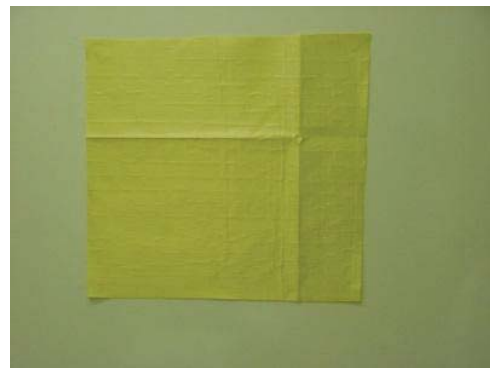
شکل (۳- a) نانوزره‌ای که با علامت GT۱۲ مشخص شده و با پرتابه سوراخ شده است را نشان می‌دهد. نانوزره آستنیتی که با نام GT۱۴ مشخص شده است (شکل ۳- b)، نیز مانند نمونه‌های دیگر، از استاندارد ۴۵۶۹STANAG پیروی می‌کند. نمونه دیگر، لایه آستنیت/نانو آستنیت است که با GT۱۸ مشخص شده است (شکل ۳- c) و کم‌ترین مقاومت در برابر پرتابه را از خود نشان می‌دهد.

اندازه‌گیری سختی لایه‌های سطحی در سطح مقطع زره انجام شده است. (شکل‌های ۴-۶). سه سری آزمون سختی در سه نقطه در لایه‌های سطحی به‌طور کامل اندازه‌گیری شده و مشخص شده است که سختی میانگین تمام زره‌ها در فاصله ۸۰ تا ۸۵ راکول (HRA) A بوده است. ضخامت مؤثر نانو ساختار همانند سختی بر کاهش سرعت پرتابه در حین ایجاد حفره تأثیرگذار بوده است.

در مورد زره‌های GT12 و GT14، ضخامت میانگین نانو لایه‌ها ۴/۵ میلی‌متر تخمین زده شده است. زره GT14 با تغییر شدید در سختی بین لایه نانو و مواد پایه مشخصه‌یابی شده است. برای کاهش خطر ترک، آستنیت نرم به‌عنوان زیرلایه استفاده شده است.

سرامیک، ثبات بسیار بالایی در برابر تخریب UV در مقایسه با پلیمرها دارد. شکنندگی آن‌ها و همچنین تراکم خاصشان، از استفاده آن‌ها در لباس جلوگیری می‌کند. اما با اتصال شیمیایی مناسب نانوذرات سرامیکی به سطح الیاف، می‌توان از مواد در برابر اشعه UV بدون تغییر هیچ ویژگی دیگری به‌طور مؤثر محافظت کرد. این کاربرد می‌تواند توسط واکنش مناسب نانوذرات با الیاف کولار ۲۹ با استفاده از عامل اتصال‌های آلی بین الیاف و ذرات انجام شود. مشکل رطوبت، پیچیده‌تر از بقیه می‌باشد. افزودن یک مانع فیزیکی در برابر مولکول‌های آب رایج است. مشکل در سطح مولکولی این است که این مانع، یکپارچگی مولکول‌ها را در طول استفاده نگه می‌دارد، خمش را تحمل کرده و مقاومت در برابر برش لباس نظامی را فراهم می‌آورد. اما نانوذرات عامل‌دار شده شیمیایی، به مولکول‌های آب متصل شده و امکان ارائه یک سد شیمیایی با ساخت الیاف‌های آلی را فراهم می‌کند.

طرح فرضی فوق به یک جلیقه زرهی واقعی که توسط شرکت پارافلای تولید و تحت علامت تجاری "NanoPROTEC" می‌باشد اعمال شده است. فناوری‌های اختصاصی شامل یک شبکه چند عضوی است که در میان مواد دیگر، از کولار ۲۹ استفاده می‌کند؛ نانوذراتی که اصلاح شیمیایی شده و در طی فرایند ساخت به هم متصل می‌شوند. تصویری از کولار ۲۹ در شکل (۱) آمده است.



شکل ۱- شمایی از صفحه کولار، ساخت NanoPROTEC [۱۰]

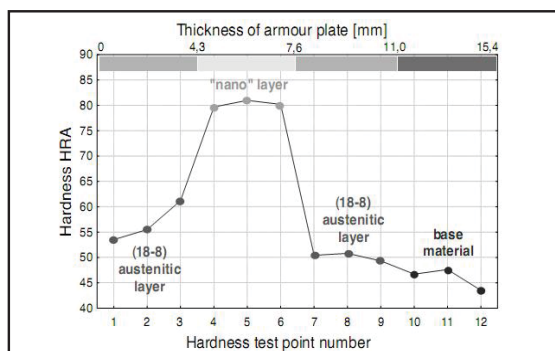
۳- کاربرد نانوفناوری در افزایش مقاومت زره‌های فلزی با جوشکاری GMA^۱

دو سازوکار اصلی شکست نفوذی زره عبارت است از:

(۱) نفوذ در زره بدون سوراخ کردن

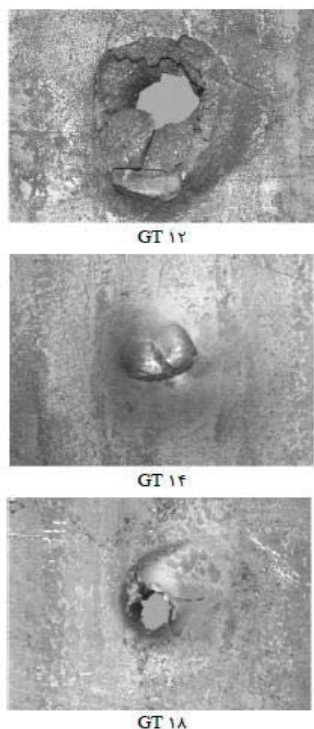
(۲) نفوذ کامل به همراه سوراخ کردن

هر دو سازوکار شکست، با ضربه پرتابه شروع می‌شود [۱۱].

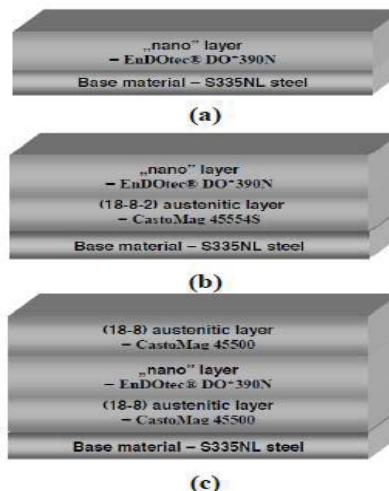


شکل ۶- توزیع سختی در مقطع عرضی زره GT18 [۱۱]

مقایسه سطح ضربه زره GT12 و GT14 (شکل ۷) نشان می‌دهد که زره GT14 با یک لایه میانی نرم، جذب انرژی ضربه بهتری دارد. کم‌ترین سختی لایه نانو ساختار، ۸۰-۸۱ HRA در سطح مقطع زره GT18 به دست آمده است، شکل (۳- c). سختی میانگین لایه نانو در زره GT18 کمتر از سختی این لایه در زره‌های GT12 و GT14 می‌باشد که این به دلیل ترکیب با آستنیت نرم به عنوان زیرلایه و لایه محافظ است، شکل‌های (۶) و (۸- c). ضخامت مؤثر لایه نانو ساختار کمتر شده و برابر ۳ میلی‌متر می‌باشد. این تنها ۲۰٪ ضخامت کل زره است (شکل ۸- c).

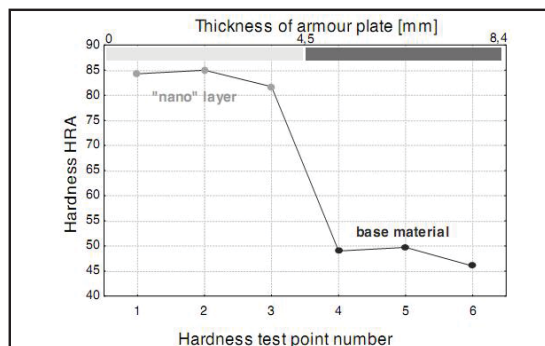


شکل ۷- نتایج آزمون پرتابه زره‌های نانو ساختار و درجه بندی شده [۱۱]

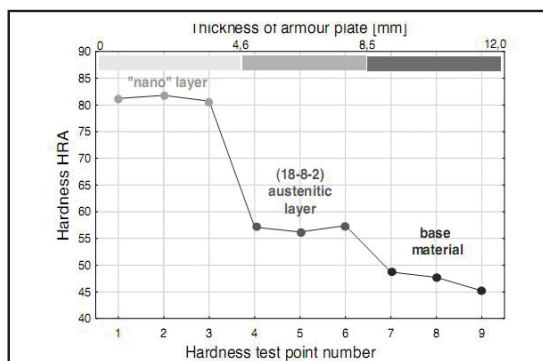


شکل ۳- ترتیب لایه‌های سطحی: (a) زره GT12 نانو (b) زره GT14 آستنیت - نانو (c) زره GT18 آستنیت - نانو - آستنیت [۱۱]

لایه آستنیت نرم همچنین، انرژی ضربه پرتابه را جذب کرده و لایه نانو ساختار ترد، از ترک‌های زیرسطحی جلوگیری می‌کند (شکل ۷). ترکیب ماده نانو سخت و آستنیت نرم در منطقه خط ذوب، کاهش اندک سختی تا ۸۱-۸۲ HRA را باعث می‌شود.



شکل ۴. توزیع سختی در سطح مقطع عرضی زره GT12 [۱۱]



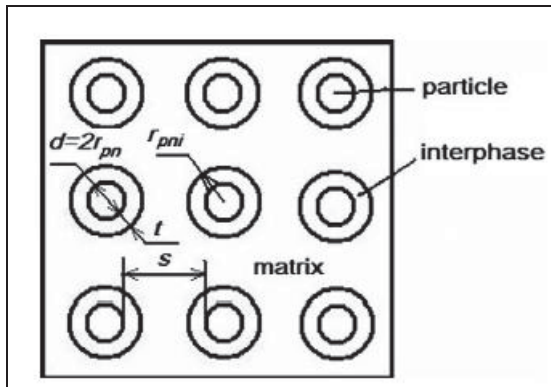
شکل ۵- توزیع سختی در مقطع عرضی زره GT14 [۱۱]

۴-۲- اثر هندسه ذره

ذرات، لوله‌ها و پلاکت‌ها سه نوع تقویت‌کننده معمولی هستند. بهبود قابل توجه استحکام ضربه نانوکامپوزیت‌های پلیمری با اضافه کردن نانولوله‌های دارای عامل آمینو و یا مقدار کمی از SWCNTs به دست آمده و چقرمگی ضربه PMMA (پلی متیل-متاکریلات) به طور قابل توجهی با افزودن نانولوله‌ها بهبود یافته است. چقرمگی و مدول پلی پروپیلن (PP) تقویت‌شده با نانولوله‌ها حداکثر در ۱٪ وزنی نانولوله نیز افزایش نشان داده است. علاوه بر این، چقرمگی ضربه و سفتی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با نانولوله‌ها مشخص شده است که تابعی از مدول یا ننگ نانولوله می‌باشد [۱۵].

۴-۳. اثر فواصل بین ذره‌ای و کسر حجمی پرکننده

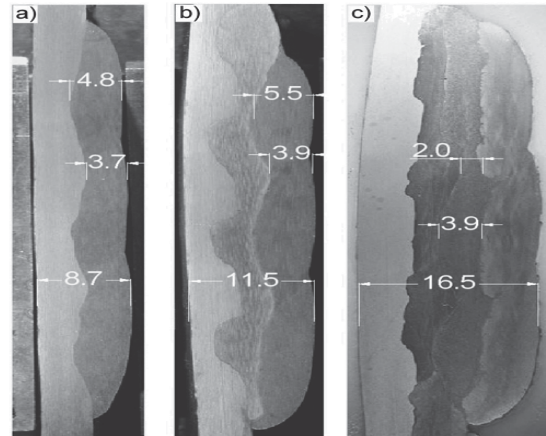
ویانا گزارش داده است که بر اساس مشاهدات تجربی وو^۱، چقرمه شدن ذرات اصلاح‌شده پلیمرهای نیمه کریستالی، مربوط به فاصله بین ذرات (S)، می‌باشد (شکل ۹). شکل (۱۰) نیز نشان می‌دهد که بهبود قابل توجهی در چقرمگی، زمانی که فاصله بین ذرات S کوچک‌تر از قطر ذرات d است، ایجاد می‌شود [۱۶]. به طور مشابه، وتزل و همکاران نیز افزایش تجربی چقرمگی شکست با افزایش نسبت قطر به فاصله ذرات را مشاهده کردند [۱۷].



شکل ۹- پارامترهای هندسی در کامپوزیت‌های تقویت‌شده با نانوذرات [۱۸]

۴-۴- اثر نوع پلیمر زمینه و پرکننده

مثالی در اینجا مطرح شده است که تقویت PP (پلی پروپیلن) و PE (پلی اتیلن) با ۴٪ وزنی نانوس، منجر به تغییرات قابل توجه در رفتار چقرمگی ضربه تحت شرایط فرایندی یکسان می‌شود. استحکام ضربه‌ای نانوکامپوزیت PP افزایش یافته است در حالی که برای نانوکامپوزیت پلی‌اتیلنی با توجه به اندرکنش قوی تر PP-خاک رس و



شکل ۸- توزیع ضخامت لایه نانوساختار (a) زره GT12، (b) زره GT14، (c) زره GT18 [۱۹]

۴- نانوتقویت‌کننده‌ها در نانوزره‌های زمینه پلیمری

اخیراً گزارش شده است که قابلیت جذب انرژی مواد کامپوزیت و خواص مربوط به آن را می‌توان با اضافه کردن پرکننده‌های نانو اندازه مهندسی کرد. برای مثال، ذرات نانویی صلب و سخت مانند SiO_2 ، TiO_2 ، CaSiO_3 ، پودر Al_2O_3 ، نانولوله‌های کربنی (CNTs) و پلاکت نانومتری خاک رس به عنوان پرکننده استفاده شده است. برخی از پارامترهای مهم در این بخش ارائه شده است.

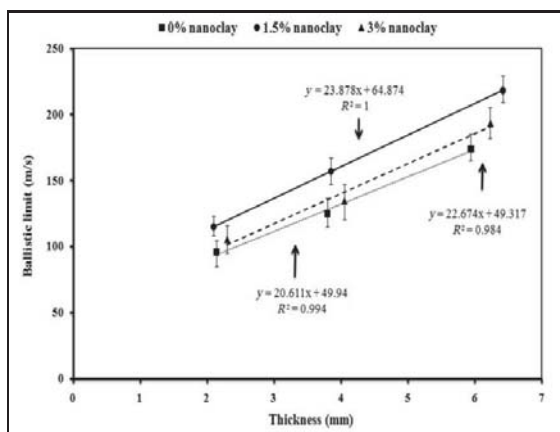
۴-۱- اثر سفتی ذره

افزایش مقدار پرکننده نرم/الاستیک میکرونی چقرمگی ضربه را بهبود می‌بخشد، اما باعث کاهش مدول الاستیسیته یک ترکیب پلیمری می‌شود. از سوی دیگر، افزایش مقدار پرکننده‌های سخت/صلب میکرونی، چقرمگی ضربه و مدول الاستیسیته این مواد را بهبود می‌بخشد. به عنوان مثال، افزودن CaCO_3 صلب و سخت با قطر ۶۰۰ نانومتر (۲٪ حجمی) در پلی‌اتیلن با چگالی بالا (HDPE)، استحکام ضربه را بیش از ۲۰۰٪ بهبود می‌بخشد. افزودن نانو ذرات Al_2O_3 به رزین اپوکسی به طور همزمان سفتی، انرژی ضربه و کرنش شکست را در میزان کم پرکننده (۲-۱٪ حجمی) بهبود می‌بخشد. این اصلاحات به طور معمول برای کامپوزیت‌های تقویت‌شده با ذرات میکرونی مشاهده نشده است [۱۲-۱۳]. نانوذرات پوسته-هسته لاستیکی (CSR) با داشتن یک هسته لاستیکی نرم و یک پوسته شیشه‌ای برای بهبود چقرمگی شکست رزین وینیل استر اپوکسی، به طور قابل توجهی بیشتر از ذرات نانوس مونتموریلونیت (MMT) که دارای کسر وزنی یکسان است می‌باشد، اما ترکیب دوتایی CSR و نانو خاک رس بهترین عملکرد متعادل از چقرمگی، مدول و استحکام را دارا است [۱۴].

خاک رس به طور کامل ورقه‌ورقه نشده باشند. میاگاوا^۲ و همکاران طول نانو پلاکت‌های رس ورقه شده را در طیف وسیعی از ۷۰ تا ۳۸۰ نانومتر اندازه‌گیری کردند و این در حالی بود که نانو پلاکت‌ها در محدوده طولی ۶۰۰-۸۰۰ نانومتر می‌باشند، زیرا ضخامت این نانو پلاکت تنها ۱ نانومتر است و به راحتی در حین تولید خاک رس ورقه‌ورقه شده و شکسته می‌شوند. به‌طور مشابه، چقرمگی شکست کامپوزیت اپوکسی پایه زیستی تقویت‌شده با نانو پلاکت، بهبود چقرمگی شکست بیشتری نسبت به کامپوزیت تقویت‌شده با نانو پلاکت، نشان می‌دهد [۲۱].

۵- رابطه ضخامت لایه نانویی با حد بالستیک

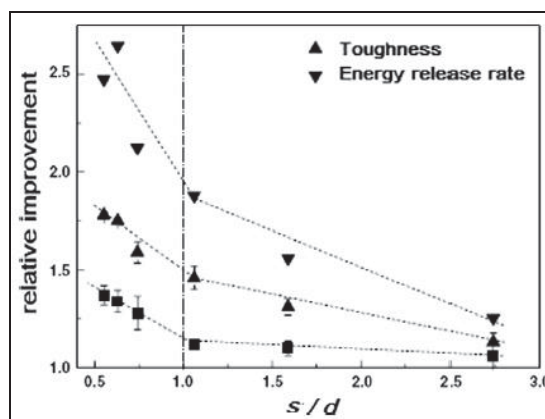
مطالعه گزارش‌های متعدد درباره پارامترهای مختلف در جذب انرژی مواد کامپوزیتی تحت ضربه سرعت بالا نشان می‌دهد که پارامترهای مؤثر برای پیش‌بینی حد سرعت‌های بالستیکی شامل موارد زیر می‌باشند: ضخامت لایه، دانسیته لایه‌ها، جرم، طول و شعاع نوک پرتابه. در این قسمت سعی شده که پارامترهای مؤثر بر خواص مکانیکی، که نه‌تنها نقش حیاتی در جذب انرژی بازی می‌کنند، بلکه با درصد‌های مختلف نانورس تغییر می‌کنند، به طور کیفی شناسایی شوند و سپس درجه وابستگی بین مقادیر حد سرعت بالستیک و این پارامترها با روش‌های مختلف بررسی شود. شکل (۱۱) حد بالستیک را بر حسب تابعی از ضخامت لایه با مقادیر مختلف نانورس نشان می‌دهد.



شکل ۱۱- حد بالستیک در برابر ضخامت نمونه‌های پلیمری با مقادیر مختلف نانورس [۲۲]

این شکل نشان می‌دهد که حد بالستیک، یک تابع افزایشی خطی از ضخامت نمونه است که پرکننده ممکن است نانورس یا دیگر مواد نانو

ضعیف‌تر PE-خاک رس، استحکام ضربه‌ای کاهش می‌یابد. اکثریت پلیمرهای نیمه‌کریستالی مانند PE و PP در نرخ کرنش کم، انعطاف پذیر هستند، اما در نرخ کرنش بالا در آزمون ضربه آیزود مورد آزمایش قرار گرفته و رفتار شکننده از خود نشان می‌دهند [۱۹].



شکل ۱۰- ارتباط بین فواصل بین ذره‌ای و چقرمگی برای نانو کامپوزیت SiO_2 /اپوکسی [۱۸]

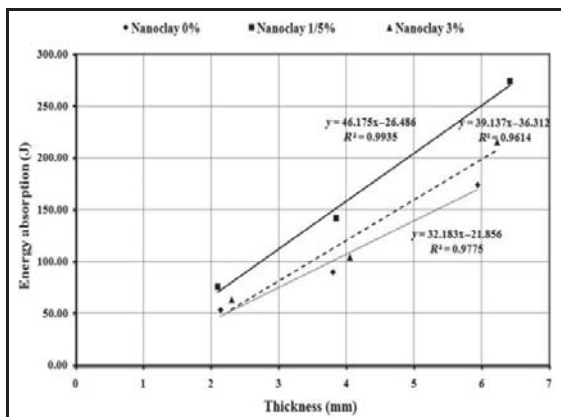
۴-۵- اثر چسبندگی فصل مشترک

پادسیادلو^۱ و همکاران، سازوکار تقویت PVA / MMT (پلی وینیل الکل / مونتموریلونیت) به‌دست‌آمده از روش لایه‌لایه (LBL) را مورد مطالعه قرار داده و نشان دادند که ساختار پلاکت رس سازمان‌یافته، حداکثر تعداد اندرکنش پلیمر MMT/ را ایجاد کرده و حرکت زنجیره پلیمر را محدود کرده است که منجر به انتقال نیروی بسیار کارآمد بین فاز پلیمر و پلاکت MMT می‌شود [۲۰].

نیروهای واندروالس در یک CNT/ پلیمر یا پلیمرهای زنجیره‌ای PVA/ MMT به شدت با دو یا سه پرکننده تداخل دارند که باعث افزایش مقاومت سطحی و انرژی مورد نیاز برای تشکیل ترک می‌شود. میاگاوا و همکاران نشان دادند که چسبندگی فرعی در فصل مشترک برای جذب انرژی ضربه ارجح است. اما بهبود استحکام ضربه برای اپوکسی صلب، با اضافه کردن نانو پلاکت‌های ارگانو رس، مشکل می‌باشد. چقرمگی شکست و میزان بحرانی انتشار انرژی با زبری سطح شکست نانورس/ اپوکسی و پلاکت سیلیکا/ اپوکسی مرتبط خواهد بود و فرض بر این است که سطح شکستگی خشن، نشانه‌ای از چسبندگی خوب بین ذرات و زمینه می‌باشد.

۴-۶- توزیع پرکننده‌ها

برخی از تجربیات نشان داده که چقرمگی با افزودن نانو پلاکت‌های خاک رس به اپوکسی بهبود یافته و آن زمانی است که نانو پلاکت



شکل ۱۲- جذب انرژی در برابر ضخامت نمونه‌های پلیمری با مقادیر مختلف نانورس [۲۲]

در منحنی نیرو- جابه‌جایی، جذب انرژی به وسیله سطح زیرمنحنی تا بیشینه نیروی سوراخ کننده مشخص می‌شود. محاسبات جذب انرژی برای این منطقه نشان می‌دهد که بیشتر از ۳۵ درصد کل انرژی ضربه، به وسیله این منطقه برای غلبه بر مدول نرمی الاستیک خمشی جذب می‌شود. به عبارتی دیگر، در آزمون ضربه سرعت بالا، به دلیل نرخ بالای کرنش، لایه‌های کامپوزیتی، مدول الاستیک خمشی بیشتری نشان می‌دهند و غلبه بر آن بیشتر از قبل می‌باشد. این نکته، حساسیت مدول الاستیک خمشی کامپوزیت‌های لایه‌ای تحت بار ضربه‌ای سرعت بالا را تأیید می‌کند.

۶- مقایسه مدل‌های ارتقاء داده‌شده با نتایج تجربی به دست آمده در خصوص تأثیر نانوفناوری بر مقاوم‌سازی

زره‌ها

ثابت و همکاران برای مقایسه مقادیر تجربی به دست آمده برای حد سرعت بالستیک و مقادیر پیش‌بینی شده در مدل‌های مختلف، از روش زیر برای آماده‌سازی نمونه‌های آزمایش استفاده کردند. شیشه بافته E برای لباس با دانسیته 400 g/m^2 به عنوان تقویت‌کننده و رزین پلی‌استر غیر اشباع با ۴۰ درصد وزنی استایرن با ویسکوزیته cP ۶۵۰ به عنوان زمینه توسط آن‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. نانورس Cloisite B30 به عنوان یک مونتموریلونیت بهبودیافته با MT2EtOH متیل، تالو، ۲-هیدروکسیل اتیل چهار آمونیم کلراید به عنوان رس بهبودیافته مورد استفاده قرار گرفته است. MEKP و کبالت نفتالن به مقدار ۱ و ۰/۱ گرم در ۱۰۰ گرم رزین به کار رفته است. در ابتدا، نانورس برای تولید نمونه‌های حاوی ۰، ۱/۵ و ۳ درصد وزنی نانورس به مدت ۱ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه در آن قرار گرفته تا هرگونه رطوبت از آن حذف شود و سپس به رزین اضافه

باشد. این افزایش خطی در حد بالستیک و افزایش در ضخامت می‌تواند با معادله زیر نشان داده شود:

$$V_{50} = \alpha T \quad (1)$$

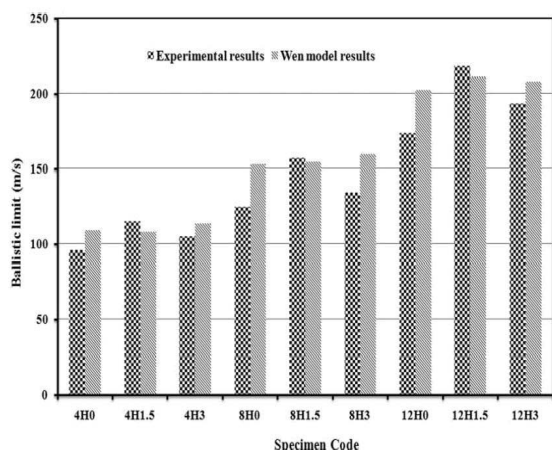
به طوری که T و α به ترتیب ضخامت لایه و شیب افزایش خطی در منحنی حد سرعت بالستیک بر حسب ضخامت می‌باشد. واضح است که شیب خطی افزایش برای V_{50} به عنوان تابعی از ضخامت لایه، بیشترین مقدار را برای نمونه‌های حاوی ۱/۵ درصد وزنی نانورس دارد. همان‌طور که در شکل (۱۱) نشان داده شده است افزایش ضخامت منجر به افزایش شیب منحنی تا ۲۳/۸ و ۲۲/۶۷ برای لایه‌های حاوی ۱/۵ و ۳ درصد وزنی نانورس می‌باشد. با این وجود، برای لایه‌های بدون نانورس، با افزایش ضخامت، شیب منحنی تا ۲۰/۶۱ افزایش می‌یابد

همچنین، نتایج مشابه برای جذب انرژی به عنوان تابعی از ضخامت برای نمونه‌های مشابه در شکل (۱۲) آورده شده است. در این شکل، می‌توان دریافت که لایه‌های حاوی نانورس بهبود بیشتری در مقادیر سرعت بالستیک با افزایش ضخامت نشان می‌دهند. شیب افزایش خطی جذب انرژی به عنوان تابعی از ضخامت لایه ۳۲/۱۸ برای نمونه‌های بدون نانورس می‌باشد. افزایش تا ۳۹/۱۳ و ۴۶/۱۷ برای نمونه‌های حاوی ۳ و ۱/۵ درصد وزنی نانورس قابل مشاهده است. بنابراین، برای نانوکامپوزیت‌های لایه‌ای، مقادیر جذب انرژی مشابه مقادیر حد بالستیک است که هر دو یک رابطه خطی با ضخامت لایه از خود نشان می‌دهند که به صورت معادله زیر نوشته می‌شود:

$$E_{50} = \beta T \quad (2)$$

به طوری که T و β به ترتیب ضخامت لایه و شیب منحنی جذب انرژی بر حسب ضخامت می‌باشد. این شکل‌ها بیان می‌کنند که شیب خطی برای ورقه‌های حاوی نانورس مقادیر بیشتری بر حسب افزایش ضخامت در برابر لایه‌های بدون نانورس نشان می‌دهند. به این ترتیب، اثر نانورس بر لایه‌های ضخیم در مقایسه با لایه‌های نازک، بیشتر است. همچنین، می‌توان دریافت که بیشترین شیب افزایش برای نمونه حاوی ۱/۵ درصد وزنی نانورس در مقایسه با نمونه‌های حاوی ۳ درصد وزنی می‌باشد و این نشان می‌دهد که نوع و حالات پراکندگی، نقش کلیدی را در رفتار ضربه با سرعت بالای نانو کامپوزیت‌ها بازی می‌کند. همچنین به منظور بررسی سازوکارهای دیگر جذب انرژی کامپوزیت‌های لایه‌ای تحت آزمون ضربه، رفتار نفوذ و سوراخ‌کنندگی شبه استاتیک برای همه نمونه‌ها بررسی شده است. آزمون نفوذ و سوراخ‌کنندگی با سرعت ۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام شده است.

داده شده است). این می‌تواند مربوط به تفاوت بین مقادیر استحکام فشاری ضخامت نانوکامپوزیت‌های لایه‌ای حاوی ۱/۵ درصد وزنی نانورس و لایه‌های کامپوزیتی باشد.



شکل ۱۳- مقایسه حد سرعت بالستیک مدل ون و نتایج تجربی ثابت و همکاران [۲۲]

۶-۱-۲. مدل واکر

این مدل بر پایه تشکیل شکل هرمی در وجه پشتی لایه‌ها به‌عنوان پیامد ضربه می‌باشد. واکر گزارش داده که نسبت ارتفاع هرم (h) مشاهده‌شده تجربی به قطر آن (R) مقداری ثابت است. مقایسه حد سرعت بالستیک از این روش با داده‌های تجربی ثابت و همکاران در شکل (۱۴) آمده است. این شکل، توافق خوبی بین نتایج تجربی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط این مدل، برای نمونه‌های با دیواره ضخیم را نشان می‌دهد. این هماهنگی در ورقه‌های ضخیم می‌تواند مربوط به دو پارامتر باشد: حساسیت کم لایه‌های ضخیم به هندسه نوک پرتابه در سرعت ضربه بالا و همچنین حساسیت کم به نرخ کرنش بالا.

به این دلیل که دانسیته لایه‌ها همچنین یکی از پارامترهای دخیل در پیش‌بینی حد بالستیک در مدل واکر می‌باشد، همان‌طور که در شکل (۱۴) نشان داده شده است، در لایه‌های ضخیم، به دلیل تفاوت ناچیز بین دانسیته نمونه‌های حاوی نانورس و نمونه‌های بدون نانورس، نتایج آزمایشگاهی به‌دست‌آمده بسیار نزدیک به مقادیر پیش‌بینی‌شده مدل می‌باشد. اما با افزایش تعداد لایه‌ها، این سازگاری در مقدار ناپدید می‌شود. این تفاوت بین نتایج تجربی و پیش‌بینی‌های مدل می‌تواند مربوط به عدم توجه به هندسه نوک پرتابه در مدل باشد. همچنین در نمونه‌های با دیواره نازک، حساسیت بیشتری به هندسه پرتابه وجود دارد و تفاوت بیشتر در دانسیته در

شده و در یک میکسر به مدت ۸۰ دقیقه در ۸۰۰۰ دور بر دقیقه به طور همگن مخلوط شده است.

نمونه‌های کامپوزیت پلیمری به روش لایه به لایه با استفاده از شیشه E و ترکیب رزین/نانورس در ابعاد 22500 mm^2 در سه لایه مختلف ۴، ۸، و ۱۲ تولید شده است. تمام نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق و سپس ۲۰ ساعت در دمای ۸۰ درجه حرارت داده شده‌اند. کسر جرمی تارها در لایه‌ها بر اساس زمینه کامپوزیت از ۰/۵۰ تا ۰/۵۲ متغیر است. ضخامت نمونه‌ها از ۲/۱۰ تا ۴/۶ میلی‌متر بر اساس تعداد لایه‌ها و درصد نانورس تغییر می‌کند.

۶-۱-۶. آزمون ضربه سرعت بالا

آزمون‌های ضربه سرعت بالا به‌وسیله تفنگ گازی با سرعت در حدود ۱۱۰ تا ۲۲۰ m/s انجام شده است. پرتابه استفاده‌شده برای تمام آزمون‌ها، فولاد سخت شده دارای نوک نیم کروی (60 Rc) به طول ۲۶/۵ میلی‌متر، قطر ۷/۸ میلی‌متر و وزن ۱۱/۵۴ گرم بوده است. سرعت‌های ضربه که باعث سوراخ شدن می‌شوند، قادر به عبور از هدف‌های کامپوزیتی نبوده‌اند، بدین معنی که سرعت خروجی آن‌ها صفر بوده است لذا به‌عنوان حد بالستیک V50 یا Vbl معرفی شده‌اند [۲۲].

۶-۱-۱. مدل ون

مقایسه نتایج آزمایشگاهی حدود سرعت بالستیکی برای نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف نانورس آن توسط ثابت و همکاران به‌دست‌آمده و داده مدل‌ها برای یک پرتابه با نوک نیم‌کروی که توسط ون و همکاران ارائه شده در شکل (۱۳) آمده است. در کاربرد داده‌های آزمایشگاهی ثابت و همکاران برای مدل ون، فرض شده است که استحکام فشاری ضخامت، برای نمونه‌های حاوی نانورس برابر نمونه‌های بدون نانورس می‌باشد. نتایج، انطباق خوبی بین داده‌های تجربی و مقادیر پیش‌بینی‌شده این مدل، در تمام ضخامت‌های حاوی مقادیر مختلف درصد نانورس را نشان می‌دهد. این توافق نزدیک برای ضخامت‌های مختلف می‌تواند به ملاحظات انجام‌شده برای نوک پرتابه مرتبط شود. دلایل دیگر می‌تواند مربوط به فشار مقاومتی نیمه‌استاتیک به دلیل تغییر فرم الاستیک-پلاستیک ماده هدف و فشار مقاومتی دینامیکی باشد.

تفاوت‌های اندک بین پیش‌بینی مدل‌ها و نتایج تجربی می‌تواند مربوط به عدم تطابق جزئی در استحکام فشاری خارج از صفحه لایه‌ها به‌عنوان یک پیامد اضافه کردن نانورس و تغییر در درصد وزنی تار و دانسیته صفحه می‌باشد.

در نمونه‌های حاوی ۱/۵ درصد وزنی نانورس، نشان داده شده است که داده‌های تجربی برای مقدار حد بالستیک بیشتر از مقادیر پیش‌بینی شده آنالیزی می‌باشد (همان‌طور که در شکل (۱۳) نشان

نانومواد دارای نسبت ابعادی بیشتری می‌باشند و انرژی‌ای که توسط این نسبت ابعادی زیاد پخش می‌شود بیشتر بوده و در نتیجه، انرژی بیشتری جذب می‌شود. حضور نانورس همچنین استحکام برشی بین لایه‌های و خواص فصل مشترک بین زمینه و فیبر را بهبود می‌بخشد که منجر به افزایش مقاومت به ضربه با سرعت بالا در کامپوزیت لایه‌ای می‌شود. این مسئله در معادله لوپز لحاظ نشده است. لوپز گزارش داده که این مدل، یک مدل آنالیزی برای ضربه با سرعت بالا برای ورقه‌های لایه‌ای پیچیده نازک است. در کل، این مدل برای لایه‌های نانوکامپوزیتی نازک مناسب‌تر می‌باشد [۲۲].

۶-۱-۴- مدل موری

شعاع قاعده مخروط تشکیل شده (Rc) در وجه پشتی کامپوزیت با استفاده از تخمینی که قبلاً توسط موری و همکارانش ارائه شده محاسبه شده است، به طوری که محاسبه تجربی آن مقدار، تقریباً برابر قطر پرتابه به دست آمده است. مدل موری و همکاران، حد سرعت بالستیک را در مقایسه با نتایج تجربی به شدت ناچیز در نظر گرفته است. این مدل موفق نشده است که پیش‌بینی نزدیکتری به رفتار ضربه سرعت بالای کامپوزیت‌های لایه‌ای، به عنوان پیامد اضافه کردن نانورس در مقایسه با نتایج تجربی ارائه دهد. علاوه بر آن، این مدل هیچ‌گونه تفاوتی بین حد سرعت بالستیک به دست آمده برای ورقه‌های لایه‌ای با و بدون نانورس نشان نمی‌دهد، اگرچه که افزایش برخی از خواص فیزیکی و مکانیکی لایه‌ها در حضور نانورس را برای کامپوزیت‌های لایه‌ای نشان داده است.

۶-۲- مقایسه انرژی از دست رفته و شکست پرکننده‌ها در

پلیمرهای تقویت شده با میکرو و نانوذرات و معادلات حاکم

فرض شده است که تعداد n نانو ذره، دارای حجم V_{mf} به میزان پرکننده‌های میکرونی باشد. همچنین فرض شده که ماده زمینه، پلاستیک صلب بوده و پرکننده‌های میکرو و نانو، الاستیک خطی اند به طوری که کل تنش از طریق زمینه به پرکننده‌ها تنها با تنش برشی فصل مشترک پیرامون پرکننده‌ها، وقتی که پرکننده به زمینه متصل است منتقل می‌شود. استحکام برشی فصل مشترک برای میکروسایزها و زمینه، τ_{mf} و برای نانوسایزها و زمینه، τ_{nf} می‌باشد. طول بحرانی که تارهای میکرونی، تحت تنش می‌شکنند به صورت زیر است [۲۳]

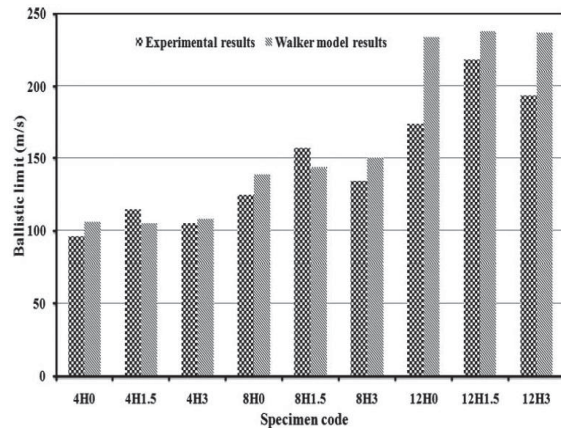
$$L_{cf} = \frac{r_{mf} \sigma_{mf}}{\tau_{mf}} \quad (1)$$

به طوری که σ_{mf} استحکام کششی میکروفیبر بوده و بیشینه انرژی خارج شده از هر فیبر برابر است با:

حضور نانورس منجر به افزایش نسبت دانسیته محصول به جرم پرتابه می‌شود که تاثیر مستقیم بر حدود سرعت بالستیک دارد.

می‌توان دریافت که در این مدل، حد سرعت بالستیک پیش‌بینی شده که برای نمونه‌های حاوی نانورس به دست آمده است در مقایسه با نمونه‌های بدون نانورس نشان می‌دهد که مقادیر دقیق‌تری برای حدود سرعت بالستیک پیش‌بینی می‌کند؛ به خصوص وقتی که تعداد لایه‌ها مخصوصاً در نمونه‌های حاوی ۱/۵ درصد وزنی نانورس، افزایش می‌یابد. سازگاری نزدیک بین داده‌های مدل و مقادیر تجربی برای نمونه حاوی ۱/۵ درصد نانورس می‌تواند مربوط به اثر نانورس بر سرعت انتشار موج در تارهای تقویت کننده در ماده کامپوزیت باشد، و همچنین افزایش دانسیته لایه‌های حاوی نانورس که منجر به تغییر در حد سرعت بالستیک می‌شود.

در کل، این مدل برای لایه‌های نانو کامپوزیتی نازک مناسب‌تر می‌باشد.



شکل ۱۴- مقایسه حد سرعت بالستیک برای مدل واکر و مقادیر تجربی [۲۲]

۶-۱-۳- مدل لوپز

این مدل بر پایه معادله دیفرانسیلی ناهمگن می‌باشد و بیان کرده است که سازوکارهای اصلی، ترکیبی از لایه، شکست تار و خورد شدن نمونه می‌باشد. نتایج، سازگاری خوبی بین مقادیر به دست آمده از مدل و نتایج تجربی برای نمونه‌های بدون نانورس با تعداد لایه‌های مختلف مخصوصاً ۴ و ۸ لایه نشان می‌دهد. همچنین نتایج برای نمونه‌های حاوی نانورس، مقادیر بیشتری در مقایسه با پیش‌بینی‌های مدل، مخصوصاً برای نمونه‌های حاوی ۱/۵ درصد وزنی نانورس نشان می‌دهد.

این تفاوت نشان می‌دهد که وجود مواد نانورس مخصوصاً ۱/۵ درصد نانورس ورقه‌ورقه شده، مقادیر قابل توجهی از کل انرژی پرتابه در لایه‌های نانوکامپوزیت را جذب می‌کند. علت این است که این

$$G_{pd} = 4\pi r_p^2 \left(\frac{3\sigma_{ms}^2 r_p^3}{4\pi E_m} \right) = \frac{3\sigma_{ms}^2 r_p^3}{E_m} \quad (۸)$$

به طوری که E_m و σ_{ms} به ترتیب استحکام تسلیم و مدول الاستیسیته ماده زمینه است. با فرض این که شکست مشابه برای نانوذرات اتفاق افتد، نسبت انرژی شکست برای ترکیبی از نانوذرات کروی به انرژی شکست یک میکرو ذره با حجم کل یکسان به صورت زیر می باشد:

$$\frac{NG_{nd}}{G_{pd}} = \frac{N \sigma_{ms}^2 r_{pn}^3}{\sigma_{ms}^2 r_p^3} = \left(\frac{r_p}{r_{pn}} \right)^3 \frac{\sigma_{ms}^2 r_{pn}^3}{\sigma_{ms}^2 r_p^3} = 1 \quad (۹)$$

که G_{nd} انرژی شکست فصل مشترک برای یک نانوذره صلب است. این نشان می دهد که انرژی تخمین زده شده مرتبط با جدایش ذرات کروی از زمینه برابر همان مقدار انرژی برای ترکیبی از نانوذرات با حجم یکسان می باشد. نانوذرات اغلب به وسیله یک فاز واسط ضخیم با شعاع $r_{pmi} > r_{pn}$ احاطه می شود [۲۵] و جدایش می تواند بیرون این فاز اتفاق افتد. اگر حجم نانوذره بر حسب r_{pn} و جدایش r_{pmi} باشد، نسبت مربوطه به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{NG_{nd}}{G_{pd}} = \left(\frac{r_{pmi}}{r_{pn}} \right)^3 > 1 \quad (۱۰)$$

در این صورت، کامپوزیت های تقویت شده با نانوذرات در جذب انرژی، بسیار مؤثرتر از کامپوزیت های تقویت شده با میکروذرات کروی می باشند.

۷- نتیجه گیری

۱- با افزودن لایه نانو ساختار بین لایه های آستنیتی در زره، سازوکار تخریب زره از حالت نفوذ به همراه سوراخ کردن به حالت بدون سوراخ تبدیل شده است.

۲- نتایج نشان می دهند که لایه های حاوی نانورس با افزایش ضخامت دارای بهبود بیشتری در حدود سرعت بالستیک می باشند.

۳- افزودن نانوذرات به لایه ها و ورق های زرهی باعث بهبود مقاومت به نفوذ در زره ها می گردد.

۴- با افزودن نانوذرات به کامپوزیت ها، قابلیت جذب انرژی به طور قابل توجهی افزایش می یابد.

۵- در مقایسه نتایج آزمایشگاهی، حدود سرعت بالستیکی برای نمونه های حاوی مقادیر مختلف نانومواد و داده مدل ها برای یک پرتابه می توان گفت که نتایج برای نمونه های حاوی نانورس مقادیر بیشتری در مقایسه با پیش بینی های مدل نشان می دهد، مخصوصاً برای نمونه های حاوی ۱/۵ درصد وزنی نانورس.

$$C_{pmf} = \frac{\pi r_{mf} \tau_{mf} L_{cf}^2}{12} = \frac{\pi r_{mf}^3 \sigma_{mf}^2}{12 \tau_{mf}} \quad (۲)$$

تعداد مورد نیاز نانو فیبرهایی که دارای حجم کل برابر با میکرو فیبر بوده و در زمینه یکسان قرار دارند برابر است با:

$$n_p = \frac{V_{mf}}{V_{nf}} = \frac{r_{mf}^2 L_{cf}}{r_{nf}^2 L_{cn}} \quad (۳)$$

به طوری که V_{nf} و L_{cn} به ترتیب شعاع، طول بحرانی و حجم یک نانو فیبر می باشد.

نسبت انرژی کل خارج شده برای یک ترکیب n تایی نانو فیبر به انرژی کل خارج شده برای یک میکرو فیبر با همان حجم به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\frac{n_p G_{pmf}}{G_{pmf}} = \frac{\pi r_{mf} \tau_{mf} L_{cn}^2}{r_{mf} \tau_{mf} L_{cf}^2} = \sigma_{nf} / \sigma_{mf} \quad (۴)$$

σ_{nf} و G_{pmf} استحکام کششی و بیشینه انرژی خارج شده از یک نانو فیبر می باشد. نسبت σ_{nf}/σ_{mf} برای نانو لوله های کربنی و فیبرهای کربنی معمولاً بین ۴ تا ۱۰۰ است. بنابراین، انرژی جذب شده توسط نانو فیبرها بسیار بیشتر از میکرو فیبرهای متداول با مقدار حجم یکسان می باشد. می توان مقدار انرژی شکست یک میکرو فیبر و ترکیب n فیبر نانو را به دست آورد. انرژی شکست میکرو فیبر دارای خواص الاستیک خطی از رابطه زیر به دست می آید:

$$G_{fmf} = \frac{\pi \sigma_{mf}^2 r_{mf}^2 L_{cf}}{2E_{mf}} \quad (۵)$$

که E_{mf} مدول کششی میکرو فیبر است. نسبت انرژی شکست نانو فیبرها به یک میکرو فیبر دارای حجم یکسان نیز به صورت زیر است:

$$\frac{n_f G_{fmf}}{G_{fmf}} = \frac{n_f \sigma_{nf}^2 r_{nf}^2 L_{cn}}{2E_{nf}} \frac{2E_{mf}}{\sigma_{mf}^2 r_{mf}^2 L_{cf}} = \frac{L_{cf}}{L_{cn}} \frac{E_{mf}}{E_{nf}} \left(\frac{\sigma_{nf}}{\sigma_{mf}} \right)^2 \quad (۶)$$

G_{fmf} و E_{mf} بیشینه انرژی شکست و مدول کششی نانو فیبرها می باشند. تخمین زده شده است که مقدار عددی این نسبت برای نانولوله های کربنی معمول و فیبرهای کربنی حداقل ۱۰۰۰ خواهد بود. بنابراین جذب انرژی در هر دو فیبر خارج شده و شکست فیبر برای ترکیب نانو فیبرها بسیار بیشتر از میکرو فیبرهای با حجم یکسان است.

انرژی شکست G_{pd} ، یا انرژی شکست فصل مشترک برای میکرو ذره صلب برابر است با [۲۴]:

12. Liu, Z. "Effects of coupling agent and morphology on the impact strength of high density polyethylene/CaCO₃ composites."; *Polymer*, 43(8), 2501-2506, (2002).
13. Wetzel, B; Hauptert, F; Qiu Zhang, M. "Epoxy nanocomposites with high mechanical and tribological performance."; *Composites Science and Technology*, 63(14), 2055-2067, (2003).
14. Subramaniyan, A.K; Sun, C. "Toughening polymeric composites using nanoclay: crack tip scale effects on fracture toughness."; *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(1), 34-43, (2007).
15. Cooper, C.A. "Distribution and alignment of carbon nanotubes and nanofibrils in a polymer matrix."; *Composites Science and Technology*, 62(7), 1105-1112, (2002).
16. Zhang, H. "Property improvements of in situ epoxy nanocomposites with reduced interparticle distance at high nanosilica content."; *Acta Materialia*, 54(7), 1833-1842, (2006).
17. Wetzel, B; Rosso, P. "Epoxy nanocomposites–fracture and toughening mechanisms."; *Engineering fracture mechanics*, 73(16), 2375-2398, (2006).
18. Sun, L; Gibson, R.F. "Energy absorption capability of nanocomposites: a review."; *Composites Science and Technology*, 69(14), 2392-2409, (2009).
19. Stefanescu, E.A. "Hybrid polymer–clay nanocomposites: a mechanical study on gels and multilayered films."; *Polymer*, 49(17), 3785-3794, (2008).
20. Windle, A.H. "Two defining moments: A personal view by Prof. Alan H. Windle. *Composites Science and Technology*, 67(5), 929-930, (2007).
21. Miyagawa, H. "Effect of clay and alumina-nanowhisker reinforcements on the mechanical properties of nanocomposites from biobased epoxy: a comparative study."; *Industrial & engineering chemistry research*, 43(22), 7001-7009, (2004).
22. Esfahani, J.M; Esfandeh, M. Sabet, A.R. "Analytical models versus experimental results for composites containing nanoclay as secondary reinforcement under high velocity impact."; *International Journal of Crashworthiness*, 17(4), 430-444, (2012).
23. Sun, L., et al., Energy absorption capability of nanocomposites: a review. *Composites Science and Technology*, 2399-2409, (2009).
24. Norman, D.A. and R.E. Robertson, Rigid-particle toughening of glassy polymers, *Polymer*, 2351-2362, (2003).
25. Eitan, A., et al., Reinforcement mechanisms in MWCNT-filled polycarbonate. *Composites Science and Technology*, 1162-1173, (2006).

۸- تشکر و قدردانی

در اینجا لازم می‌دانیم از همکاری صمیمانه مرکز تحقیقات بالستیک، ضربه و انفجار دانشگاه جامع امام حسین(ع) کمال تشکر را داشته باشیم.

مراجع

۱. گواهی، تورج؛ مقدمه‌ای بر سازه‌های امن و استحکامات، انتشارات دانشگاه جامع امام حسین(ع)، (۱۳۹۱).
2. Børvik, T; Dey, S; Clausen, A. H. "Perforation resistance of five different high-strength steel plates subjected to smallarms projectiles."; *International Journal of Impact Engineering*, 36, 948-964, (2009).
3. Chin, E. "Army focused research team on functionally graded armour composites."; *Materials Science and Engineering A*, 259, 155-161, (1999).
4. Pettersson, A; Magnusson, P; Lundberga, P; Nygren, M. "Titanium–titanium diboride composites as part of a gradient armour material."; *International Journal of Impact Engineering*, 32, 387-399, (2005).
5. Übeyli, M; Yildirim, R; Ögel, B. "Investigation on the ballistic behaviour of Al₂O₃/Al₂O₂₄ laminated composites."; *Journal of Materials Processing Technology*, 196, 356-364, (2008).
6. Keçeli, Z; Ögünç, H; Boyraz, T; Gökçe, H; Addemir, O; Lütfi Öveçoğlu, M. "Effect of B₄C addition on the micro-structural and thermal properties of hot pressed SiC ceramic matrix composites."; *Journal of Achievements in Mechanical and Manufacturing Engineering*, 37/2, 428-433, (2009).
7. Lee, Y. S.; Wetzel, E. D.; Egres, R. G.; Wagner, N. J. "ADVANCED BODY ARMOR UTILIZING SHEAR THICKENING FLUIDS", 23rd Army Science Conference, Orlando, 29-40, (2002).
8. Sun, L.; Gibson, R. F.; Gordaninejad, F.; Suhr, J. "Energy absorption capability of nanocomposites: A review"; *Composites Science and Technology*, 69, 2392–2409, (2009).
9. Kitagawa, T; Yabuki, K; Young, R. "An investigation into the relationship between processing, structure and properties for high-modulus PBO fibres. Part I. Raman band shifts and broadening in tension and compression."; *Polymer*, 42(5), 2101-2112, (2001).
10. Balisti, N.Z; Materiale, N. "Nanotechnology for ballistic materials: from concepts to products."; *Materiali in tehnologije*, 47(3), 267-271, (2013).
11. Klimpel, A; Luksa, K; Burda, M. "Structure and properties of GMA surfaced armour plates."; *Science and Engineering*, 43(2), 109-116, (2010).

Reinforcing Armors by Nanotechnology

S. A. Vaziri¹

S. A. Hosseini Khorasani²

Abstract

Passive defense is defined as measures that do not need to make use of weapons and could reduce financial damage and casualties or mitigate their effects. Passive defense includes cover, dispersion, redundancy and displacement, deception, warning, reinforcements and safe structures. One of the passive defense measures is reinforcement by armors that can defend vehicles against attack, through increasing the resistance and efficiency of armored vehicles in the future battlefields. Nano Armors, are materials whose structure is either made in nano or nanoparticles are used in their structure. Using nanotechnology would enhance armor efficiency against high speed projectiles. In this Article, the desired impact of nanotechnology for armors reinforcement including body armors and armored vehicles are investigated.

Key Words: *Passive Defense, Nano Armors, Nanotechnology, Reinforcement, Energy Absorption*