مروری بر استفاده از فلزات شیشه‌ای (BMG) در ساخت نفوذگرهای پرانرژی و شبیه‌سازی برخورد یک نفوذگر کامپوزیتی W/BMG با هدفی فولادی

سید محسن امامی[۱]، سید عباس وزیری[۲]

[۱] پژوهشکده سرامیک، پژوهشگاه مواد و انرژی

[۲] مرکز پژوهش بالستیک، ضربه و انفجار، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)



سید محسن امامی مولف اصلی این مقاله، دانشجوی دکتری مهندسی مواد- سرامیک پژوهشگاه مواد و انرژی می‌باشند.

emami.sme@gmail.com

چکیده: پژوهش گسترده‌ای روی فلزات آمورف برای ساخت نفوذگرهای با انرژی سینتیکی (KEP) انجام شده است. KEP جزء کلیدی بسیار مؤثر سیستم مهمات است و امروزه از کامپوزیت‌های شیشه فلزات حجیم (BMGs)- تنگستن به‌دلیل رفتار خودتیزشوندگی و چگالی آن، استفاده می‌شود. آزمون‌های بالستیکی از کامپوزیت‌های W/BMG نشان داده‌اند که کارایی آن‌ها در مقایسه با آلیاژهای بلوری تنگستنی بسیار بالاتر است. این امر می‌تواند مستقیما ناشی از تاثیر حضور شیشه‌های فلزی در ایجاد تغییرشکل برشی موضعی باشد. شبیه‌سازی انجام شده در این کار نیز که با روش اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس و با استفاده از مدل جانسون – کوک انجام شد، نتایج عملی انجام شده توسط سایر پژوهشگران را مبنی بر قدرت نفوذپذیری بیشتر نفوذگرهای کامپوزیتی W/BMG نسبت به سایر نفوذگرها را در یک هدف فولادی (AISI۴۳۴۰) تایید کرد. تلاش‌های کنونی و آینده بر توسعهٔ فرایندی قابل اعتماد برای تولید وسایل کامپوزیتی از شیشه فلزات با مقیاس بزرگتر از ابعاد دستگاه‌های پرتابه‌ای موجود، متمرکز شده‌اند.

کلمات کلیدی: فلزات شیشه‌ای، تنگستن، شبیه‌سازی، اجزای محدود، نفوذگرهای پرانرژی

۱- مقدمه

یک فلز آمورف ماده‌ای فلزی است که ساختار اتمی نامنظمی دارد و برخلاف اغلب فلزات که بلوری هستند و اتم‌ها چیدمان منظمی دارند، آلیاژهای آمورف غیر بلوری هستند. ماده‌ای که در این چنین ساختار نامنظمی مستقیماً از حالت مایع، و با سرد کردن به‌دست می‌آید "شیشه" نامیده می‌شود و از این رو به فلزات آمورف معمولاً "فلزات شیشه‌ای" و یا شیشه‌های فلزی یا فلزات مایع گفته می‌شود [۱،۲]. وزارت دفاع ایالات متحده پژوهش گسترده‌ای روی فلزات مایع برای نفوذگرهای با انرژی سینتیکی (KEP) انجام داده است. KEP جزء کلیدی بسیار مؤثر سیستم مهمات است و امروزه از اورانیم رقیق شده (DU) به‌دلیل چگالی و رفتار خودتیزشوندگی آن، در این سیستم استفاده می‌شود. اما امروزه آزمایش‌های بالستیک انجام شده توسط ارتش امریکا ثابت کرده‌اند که کامپوزیت‌های دارای فلز مایع، رفتار خودتیزشوندگی مشابهی با DU KEP دارند و این در حالیست که کامپوزیت‌های دارای فلز مایع سازگاری بیشتری با محیط زیست دارند. استحکام بالا و سبک وزنی آلیاژهای فلز مایع،این امکان را فراهم می‌سازد تا به‌سمت سیستم‌های سبکتر و ارزانتر حرکت کرد. امروزه فناوری‌های فلزمایع برای گستره وسیعی از کاربردهای نظامی توسعه یافته‌اند [۳].

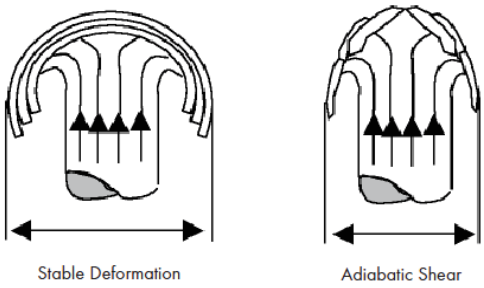
۲- نفوذگرهای با انرژی جنبشی (KEP)

مواد استاندارد با کارایی بالا که برای نفوذگرهای با انرژی جنبشی (KEPs) در امریکا و تعدادی دیگر از کشورها استفاده شده است، آلیاژ اورانیم ضعیف شده (DU) است. عملکرد آن به استحکام و چگالی بالا ($۱۸/۶ gr/cm^3$) و رفتار جریان نرم‌شوندگی موضعی آن که معمولا به‌عنوان برش بی‌دررو

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-27]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1394.11.2.4.5]

شناخته می‌شود، نسبت داده می‌شود. این امر به نفوذگر DU اجازه می‌دهد که در اثر ضربه شکل مخروطی نوک خود را برای نفوذ بیشتر حفظ کند (شکل ۱). هدف طولانی مدت از پژوهش‌های انجام شده، جایگزینی این تغییر شکل و رفتار جاری شدن در مواد غیر DU بوده است. بیشتر فناوری‌های فرایندی اخیر با تنگستن نانوبلوری و شیشه فلزات توده نشان داده‌اند که می‌توان به سازکار تغییرشکل به وجود آمده در نفوذگرهای آلیاژ DU بسیار نزدیک شد [۴].

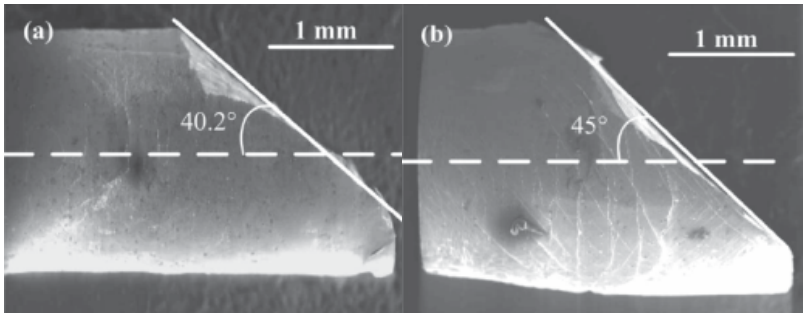


شکل ۱- تغییر شکل نفوذگر بعد از برخورد [۴]

۳- کامپوزیت‌های با زمینهٔ شیشه فلزات توده برای نفوذگرها

نفوذگرهای از جنس آلیاژ سنگین تنگستن متعارف (WHA) کامپوزیت‌های دو فازی از ذرات تنگستن غیرآلیاژی وارد شده در زمینه‌ای از آلیاژ نیکل هستند. از آنجا که فاز تنگستن خود بسیار مقاوم در برابر برش بی‌دررو است، تلاش‌ها در ابتدا روی جایگزینی آلیاژ نیکل زمینه با زمینه‌ای دیگر که حساسیت بیشتری به شکست برشی بی‌دررو داشته باشد متمرکز شد. ارتش ایالات متحده تلاش‌هایش را به‌سمت آلیاژهای شیشه فلزات حجیم (BMG) با سازکار تغییرشکل و شکست منحصر به‌فرد سوق داده و آن‌ها را به‌عنوان کاندیدی برای مواد زمینه در کامپوزیت‌های پایه تنگستنی جدید بررسی کرده است. برخلاف مواد معمول، BMGs آمورف هستند و نظم اتمی ساختاری بلند بردی ندارند و به‌دلیل ساختار منحصر به‌فردشان دارای خواص مکانیکی متفاوت و مناسبی خواهند بود. به‌ویژه، زمانی که تحت بار مکانیکی فشاری قرار می‌گیرند بدون کنترل با مواضع برشی خود، مشابه با تغییر شکل و شکست آلیاژهای اورانیم رقیق شده (DU)، تغییرشکل می‌دهند [۴].

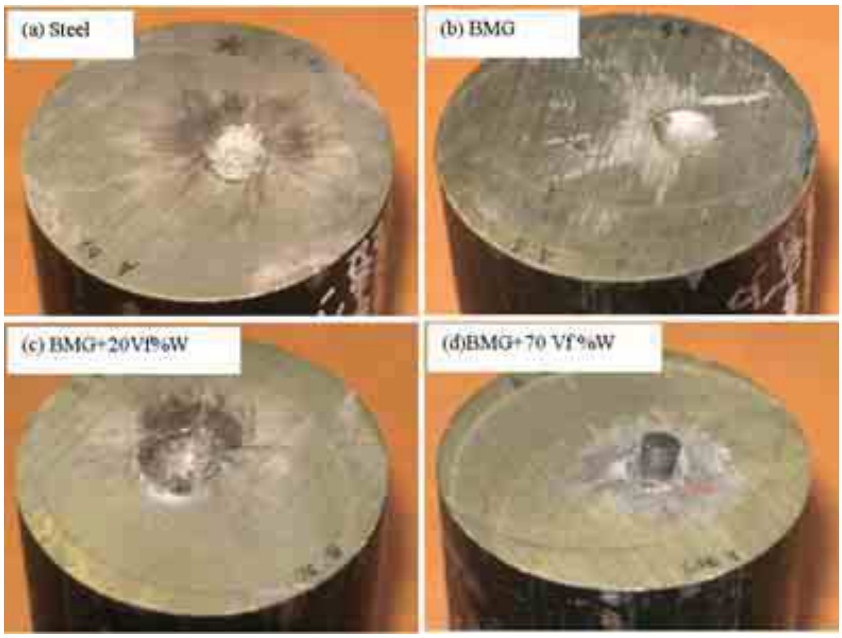
در حالی‌که شیشه فلزی تک فاز تحت فشار شبه استاتیکی (10^{-5} s^{-1}) تغییرشکل پلاستیک کمی (۰/۵ درصد) دارد کامپوزیت به‌دست آمده از آن کرنش پلاستیکی قابل توجهی (تقریبا ٪۱۶) را ارائه داده است. ضمن اینکه آزمون‌های بالستیکی نشان می‌دهد که کامپوزیت زمینه شیشه فلزی قابلیت نفوذپذیری بالاتری (۲۰-۱۰ درصد) از آلیاژ سنگین تنگستن داشته است [۵]. بر همین اساس پژوهشگران در مراکز نظامی در حال تلاش برای توسعه فناوری ساخت نوعی شیشه فلز هستند که بتواند انواع زره حفاظت شده تانک‌ها و سایر ادوات نظامی را سوراخ کرده و جایگزین مناسبی برای گلوله‌های اورانیمی که دارای اثرات سمی زیست محیطی‌اند، بشود. سیر پژوهش نشان داده است که گلوله‌های ساخته شده از جنس کامپوزیت‌های تنگستن با زمینه شیشه فلزی رفتار خودتیزشوندگی نشان می‌دهند. این ویژگی برای کاربرد ماده به‌عنوان یک سلاح ضد زره دارای اهمیت بالایی است [۵]. به‌دلیل عدم وجود نابجایی در ریزساختار BMGها، سازکار اصلی کرنش پلاستیکی مرتبط با تشکیل باند برشی در حین اعمال تنش است، چنانچه می‌توان در سطح نمونه پس از آزمایش فشار، باندهای مذکور را به وضوح مشاهده کرد (شکل ۲) [۶ و ۷].



شکل ۲-تصویر SEM از مقطع شکست نمونه آلیاژ آمورف a) $Cu_{50}Zr_{50}$، b) $Cu_{47.5}Zr_{47.5}Al_5$ پس از آزمایش فشار سرد [۶]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1394.11.2.4.5]
[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-27]

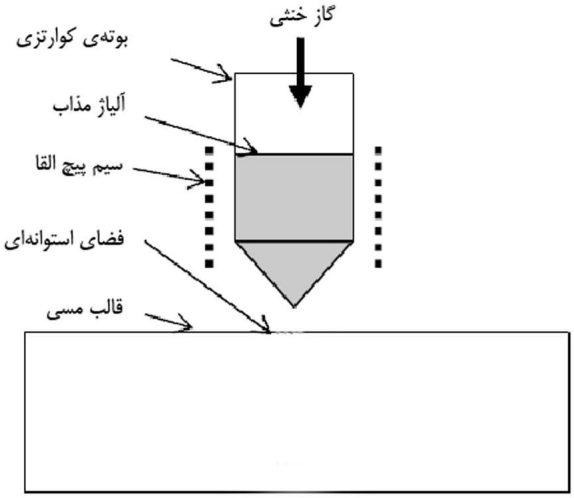
در آزمایشی دیگر نفوذگرهایی از جنس فلزات شیشه‌ای و کامپوزیت‌های آن با نفوذگرهای فولادی مقایسه شدند. این آزمایش نشان داد که فلزات شیشه‌ای و کامپوزیت‌های آن‌ها به‌سرعت‌های ضربه‌ای بالاتری نسبت به نفوذگرهای فولادی برای سوراخ کردن هدف فولادی نرم نیاز دارند. هرچند کامپوزیت‌های آلیاژی اهداف را در سرعت‌های یکسان با نفوذگرهای فولادی ولی با سرعت‌های شعاعی بالاتر سوراخ کردند. بنابراین کامپوزیت‌های آلیاژی می‌توانند نفوذگرهای سینتیکی بهتری در مقایسه با نفوذگرهای فولادی به‌حساب آیند (شکل ۳) [۸].



شکل ۳- عکس‌های سطوح اهداف فولادی با نفوذگرهای مختلف [۸]

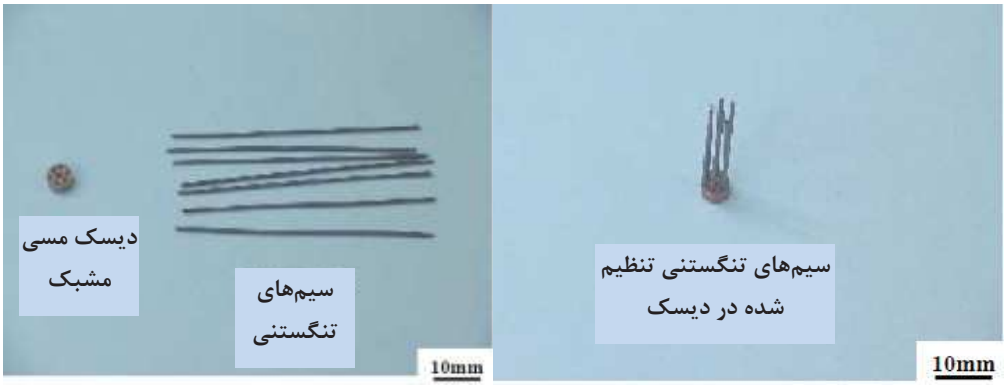
۴- ساخت نفوذگرهای پرانرژی با کامپوزیت‌های زمینهٔ شیشه فلزات توده

ساخت کامپوزیت شیشه فلز حجمی تقویت شده با الیاف تنگستن با بسیاری از روش‌ها بررسی شده است. در روشی که توسط Neogy و همکارانش [۹] انجام شده است، شمش زیرکونیم بلوری و عناصر با خلوص بالا در کوره قوس خلاء برای ساخت آلیاژ شیشه فلز پایه زیرکونیمی ذوب شدند. آلیاژ آمورف حجمی با روش ریخته گری در قالب مسی انجام شد (شکل ۴). سپس الیاف و سیم‌های تنگستنی با قطر ۱/۳۸ mm آماده شده و در یک صفحه مسی به‌طور عمودی قرار داده شده‌اند (شکل ۵).



شکل ۴-نمایش سیستم استفاده شده در ساخت شیشه فلز حجمی [۹]

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-27]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1394.11.2.4.5]



شکل ۵- تصاویر سیم‌های تنگستنی و نگه‌دارنده مسی و نحوه اتصال آن‌ها [۹]

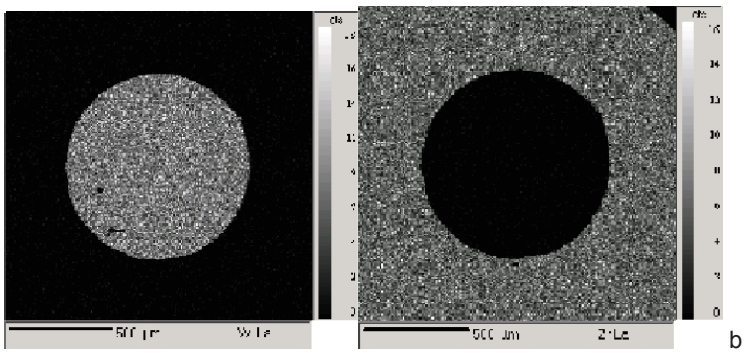
بعد از آن، قالب اصلی از جنس مس با قطر ۶ mm و طول ۵۵ mm آماده شده و الیاف تنگستنی با آرایش گفته شده در این قالب قرار گرفته و در نهایت آلیاژ شیشه‌ای، در قالب مسی محتوی سیم‌های تنگستنی ریخته‌گری شده و در اثر بالا بودن سرعت سرمایش، کامپوزیت مورد نظر حاصل شده است که در شکل ۶ دیده می‌شود. کسر حجمی الیاف تنگستن در این کامپوزیت حدود ۳۱٪ بود [۹].



شکل ۶-کامپوزیت شیشه فلز حجمی- تنگستن [۹]

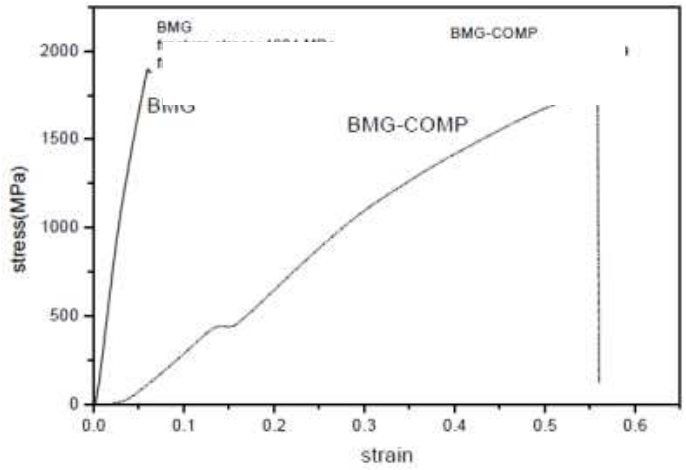
تصاویر TEM گرفته شده از کامپوزیت حاصل، نشان می‌دهد که الیاف تنگستنی بدون واکنشی با شیشه فلزی در اتصال با فاز زمینه قرار گرفته و به‌طور یکنواخت توزیع شده‌اند (شکل ۷) [۹].

نتایج آزمایش فشار دینامیکی بر BMG و BMG/W که در نمودار ۸ دیده می‌شود، نشان می‌دهد که BMG تنش شکستی کمی بیشتر (۱۹۰۴ MPa) در مقایسه با کامپوزیت (۱۷۸۳ MPa) داشته اما کرنش پلاستیک شکست برای کامپوزیت (۰/۵۵۸) بسیار بالاتر از مقدار آن برای BMG (۰/۰۶) است. این نتایج نشان می‌دهد که شیشه فلز تقویت شده با الیاف تنگستن دارای تغییرشکل با باندهای برشی بوده و در نتیجه باندهای برشی چندگانه، تغییرشکل پلاستیک جایگزین می‌شود [۹].



شکل ۷- تصویر پرتو X از فیبر تنگستن و زمینه شیشه فلز با استفاده از a) $W L_a$، b) $Zr L_a$ [۹]

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-27]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1394.11.2.4.5]



شکل ۸- نمودار تنش- کرنش تحت فشار دینامیکی برای شیشه فلز حجمی و کامپوزیت شیشه فلز/تنگستن [۹]

۵- شبیه‌سازی برخورد نفوذگر کامپوزیتی W/BMG به هدف فولادی

در این کار با استفاده از نتایج به‌دست آمده از کار دیگران که در بالا بدان اشاره شده است، نحوهٔ نفوذ گلولهٔ کامپوزیتی W / $Cu_{47}Ti_{33}Zr_{11}Ni_6Sn_2Si_1$ در داخل هدف فولادی (AISI ۴۳۴۰) توسط روش اجزای محدود (Finite Element) به‌وسیلهٔ نرم‌افزار آباکوس (Abaqus) و با استفاده از مدل مواد الاستو – ویسکوپلاستیک جانسون – کوک[1] شبیه‌سازی شده است. خواص نفوذگر و هدف فولادی که در شبیه‌سازی انتخاب شده و مورد استفاده قرار گرفته در جدول ۱ دیده می‌شود.

مدل جانسون- کوک شامل اثر خطی ترموالاستیسیته[2]، تنش تسلیم، جریان‌های پلاستیکی، سخت شدن فشار ایزوتروپیک، سرعت کرنش سختی، نرم شدن در اثر حرارت آدیاباتیک و آسیب می‌شود. تنش معادل فون-میزز[3] در مدل جانسون-کوک با فرمول زیر بیان می‌شود:

$$\overline{\sigma}(\overline{\varepsilon}^{pl}, \dot{\overline{\varepsilon}}^{pl}, \hat{T}) = \left[A + B(\overline{\varepsilon}^{pl})^n\right]\left[1 + C\ln\left(\frac{\dot{\overline{\varepsilon}}^{pl}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right]\left[1 - \hat{T}^m\right] \qquad (۱)$$

که A، B، C، n و m پارامترهای ماده هستند، $\overline{\varepsilon}^{pl}$ کرنش پلاستیک معادل، $\dot{\overline{\varepsilon}}^{pl}$ سرعت کرنش پلاستیک معادل، $\dot{\varepsilon}_0$ سرعت کرنش اولیه و $\hat{T}$ دمای بدون بعد است که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\hat{T} = (T - T_0)/(T_{melt} - T_0) \qquad T_0 \le T \le T_{melt} \qquad (۲)$$

که T دمای کاری، T_{melt} دمای ذوب ماده و T_0 دمای اتاق است. مدل شکست پیشنهادی توسط جانسون – کوک در میزان اثر تنش سه‌بعدی، سرعت کرنش و دما بر کرنش شکست معادل ($\overline{\varepsilon}_f^{pl}$) به‌صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\overline{\varepsilon}^{pl}{}_f\left(\frac{\sigma_m}{\overline{\sigma}}, \dot{\overline{\varepsilon}}^{pl}, \hat{T}\right) = \left[D_1 + D_2\exp\left(D_3\frac{\sigma_m}{\overline{\sigma}}\right)\right]\left[1 + D_4\ln\left(\frac{\dot{\overline{\varepsilon}}^{pl}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right]\left[1 + D_5\hat{T}\right] \qquad (۳)$$

که D_1 تا D_5 پارامترهای ماده، $\frac{\sigma_m}{\overline{\sigma}}$ نسبت تنش سه‌بعدی و σ_m تنش میانگین هستند. در ضمن تمامی پارامترهای مدل جانسون- کوک که در بالا بدان‌ها اشاره شده است، برای هدف فولادی در جدول ۲ آورده شده است [۱۰].

[1] Johnson-Cook elasto-viscoplastic material model
[2] Thermo-elasticity
[3] Von-Mises

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-27]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1394.11.2.4.5]

جدول ۱- ویژگی نفوذگر و هدف فولادی

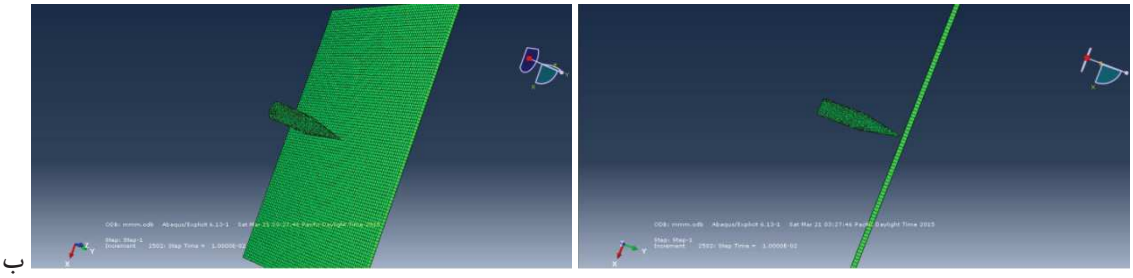
مشخصات نفوذگر		مشخصات هدف	
چگالی (gr/cm^3)	۱۶/۵	چگالی (gr/cm^3)	۷/۸
سختی (HV)	۷۷۶	سختی (HB)	۲۱۷
ثابت کشسان (GPa)	۲۱۳	ثابت کشسان (GPa)	۲۰۰
استحکام تسلیم (MPa)	۷۹۲	استحکام تسلیم (MPa)	۴۷۲
استحکام شکست (MPa)	۱۹۶۶	استحکام کششی (MPa)	۷۴۴
کرنش شکست	۱۰/۷	استحکام ضربه ایزود (j)	۵۱/۱
وزن (gr)	۹	ضخامت (mm)	۱۵
سرعت (m/s)	۸۰۰		

در نهایت با استفاده از مدل گفته شده و کاربرد روش اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس برخورد نفوذگر به هدف شبیه سازی شد که تصاویر آن در ادامه آورده شده است.

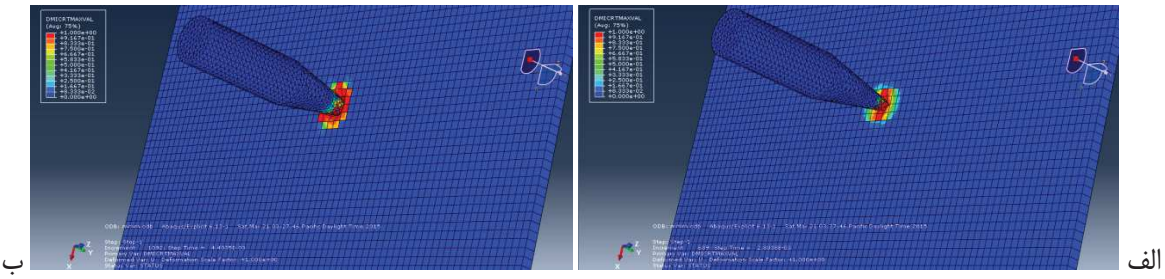
جدول ۲-پارامترهای فولاد هدف در مدل جانسون- کوک [۱۰]

پارامتر	مقدار
ثابت کشسان E (N/mm^2)	۲×۱۰^{۵}
نسبت پواسون υ	۰/۳۳
ρ(kg/m^3)	۷۸۵۰
استحکام تسلیم A (N/mm^2)	۴۸۰
B ((N/mm^2))	۳۸۳
n	۰/۴۵
سرعت کرنش اولیه ε_0' (s^{-1})	۵×۱۰^{-۴}
C	۰/۰۱۱۴
m	۰/۹۴
T_m (K)	۱۸۰۰
T_0 (K)	۲۹۳
ظرفیت گرمایی C_p (J/kgK)	۴۵۲
D_1	۰/۰۷۰۵
D_2	۱/۷۳۲
D_3	-۰/۵۴
D_4	-۰/۰۱
D_5	۰

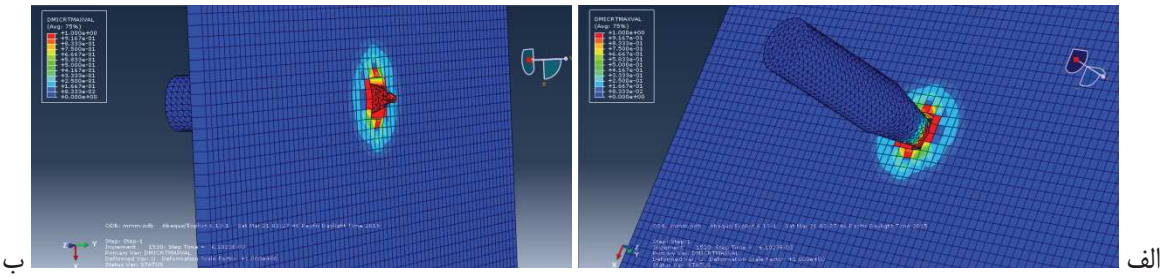
[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-27]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1394.11.2.4.5]



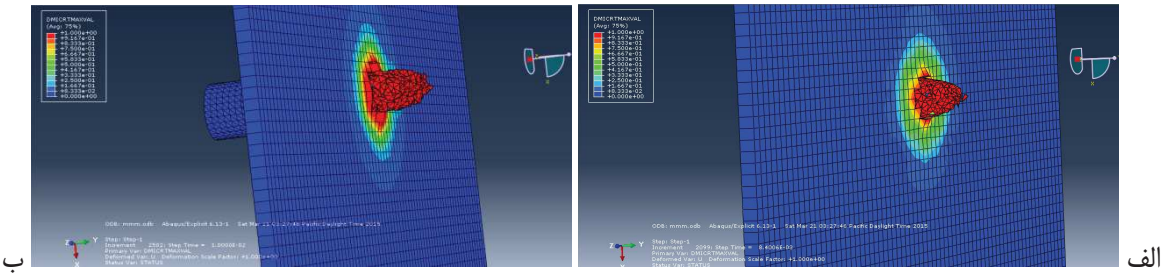
شکل ۹–لحظهٔ پیش از تماس کامل نفوذگر با هدف الف) از نمای کنار، ب) از نمای جلوی هدف



شکل ۱۰– لحظهٔ برخورد نفوذگر به هدف الف) در زمان ۰/۰۰۲ ثانیه، ب) در زمان ۰/۰۰۴ ثانیه



شکل ۱۱– لحظهٔ برخورد نفوذگر به هدف در زمان ۰/۰۰۶ ثانیه الف) از نمای جلوی هدف، ب) از نمای پشت هدف



شکل ۱۲– لحظهٔ برخورد نفوذگر به هدف از نمای پشت هدف الف) در زمان ۰/۰۰۸ ثانیه، ب) در زمان ۰/۰۱ ثانیه

همان‌طور که در تصاویر دیده می‌شود با در نظر گرفتن ریزساختار آمورف کامپوزیت و بالا بودن مقادیر چگالی، سختی و استحکام آن، در لحظهٔ برخورد گلوله به هدف، دما و فشار وارده در محل برخورد به‌شدت بالا رفته که این خود می‌تواند با توجه به سرعت بالای برخورد نفوذگر به هدف موجب آسیب و ایجاد ترک اولیه در هدف شود. سپس با ادامهٔ حرکت گلوله منطقهٔ بیشتری از هدف تحت ضربه و فشار ناشی از برخورد گلوله بوده و در نواحی اطراف محل برخورد به‌طور طبیعی میزان خسارت بیشتر خواهد بود که در تصاویر با رنگ‌های تیره‌تر (قرمز و نارنجی و زرد) مشخص هستند. پس از آن با پدیدهٔ خودتیزشوندگی که در اثر برخورد گلوله به هدف در ساختار نفوذگر رخ می‌دهد – و پیشتر در مورد آن به‌طور مفصل شرح داده شده است – قسمت‌های نوک‌تیزی در داخل نفوذگر ایجاد شده و سرعت و قدرت نفوذ گلوله در هدف افزایش می‌یابد تا بدانجا که با توجه به نازک بودن هدف، می‌تواند به‌طور کامل در کسری از ثانیه (کمتر از ۰/۰۰۶ ثانیه) آن را سوراخ کند. بنابراین همان‌گونه که در تصاویر شبیه‌سازی شده دیده می‌شود، نفوذگر کامپوزیتی $Cu_{47}Ti_{33}Zr_{11}Ni_6Sn_2Si_1$ / W اثر مورد قبولی بر روی هدف فولادی گذاشته و می‌تواند این هدف سخت را به‌راحتی سوراخ کرده و موجب نابودی اهداف سخت در نبردهای جنگی شود.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-27]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1394.11.2.4.5]

۶- نتیجه‌گیری

پژوهش و مطالعات در ساخت نفوذگرهای پرانرژی به سمت آلیاژهای شیشه فلزات حجیم (BMG) با سازکار تغییر شکل و شکست منحصر به‌فرد سوق یافته و آن‌ها را به عنوان کاندیدی برای مواد زمینه در کامپوزیت‌های پایه تنگستنی جدید مطرح کرده است. آزمایش‌های بالستیک از اولین کامپوزیت‌های تهیه شده از قلزات شیشه‌ای (مایع) نشان می‌دهد که نفوذ بیشتر از میزان انتظار، تنها به خاطر عامل چگالی بوده است. شبیه‌سازی انجام شده در این کار نیز که با روش اجزای محدود و مدل جانسون- کوک در نرم‌افزار آباکوس صورت گرفت، نتایج عملی انجام شده توسط سایر پژوهشگران را در نفوذپذیری بهتر نفوذگرهای کامپوزیتی ساخته شده از تنگستن در زمینه‌ای از شیشه فلز، تایید کرد.

مراجع

[1] A. J. Schwarz, I. C. Cristian, K. Putyera, M. Dekker, New York, USA, 2004
[2] M. I. Ojovan, W. E. Lee, J. Phy.: Con. Matt., 18, 2006, 11507.
[3] E. Axinte, Materials and Design, 14, 2011, 518.
[4] R. J. Dowding, K. C. Cho, W. H. Drysdale, L. J. Kecskes, M. A. Minnicino, M. R. Staker, The AMPTIAC Quar., 8, 2004, Number 4.
[5] T. Jiao, L. J. Kecskes, T. C. Hufnagel, K. T. Ramesh, Metall. Mat. Trans. A, 35A, 2004, 3439.
[6] J. Eckert, J. Das, K. B. Kim, F. Baier, Intermetallics, 14, 2006, 876.
[7] E. S. Park, D.H. Kim, T. Ohkubo, K. Hono, Journal of nanocrystals solid, 351, 2005, 1232.
[8] Y. Li, http://www.eng.nus.edu.sg/EResnews/0902/sf/sf3.html
[9] S. Neogy, A. Mukherjee, B. Ashwini, D. Srivastava, R.T. Savalia, G.K. Dey, N. Venkatraman, P.K. De, Inter. Symp. Res. Students on Materials Science and Engineering, December 20-22, 2004, Chennai, India.
[10] P. K. Gupta, s. K. Tak, M. A. Iqbal, Proceedings of the IMPLAST 2010 Conference, October 12-14, 2010 Providence, Rhode Island USA.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-27]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1394.11.2.4.5]