

# بررسی خواص کامپوزیت متخلخل زمینه آلومینیوم تقویت شده با نانوذرات کاربید سیلیسیم با روشهای مختلف ارزیابی خواص خزشی

یاسمن صابری کاخکی<sup>۱</sup>، سعید ناطق<sup>۲\*</sup>، شمس الدین میردامادی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی و علم مواد، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- استاد، دانشکده مهندسی و علم مواد، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

\*s.nategh@srbiau.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۰/۲۹، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۲/۰۳)

## چکیده

در پژوهش حاضر کامپوزیت آلومینیوم تقویت شده با ۴ درصد حجمی نانوذرات کاربید سیلیسیم به روش آلیاژسازی مکانیکی تولید گردید و نمونه های نانو کامپوزیتی متخلخل با روشهای مختلف تعیین خواص خزشی (با مزیت زمان کوتاهاتر انجام آزمون) مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج بیانگر وجود ضریب ثابت (۲) مرتبط کننده نرخ خزش فرورونده به نرخ خزش فشاری در تنش فرورونده (برابر با ۹۰ و ۹۷ و ۱۱۱ مگاپاسکال) سه برابر تنش خزش فشاری (۳۰ و ۳۲/۵ و ۳۵ مگاپاسکال) در نانو کامپوزیت متخلخل می باشد. تصاویر ریزساختاری توزیع حفرات در کامپوزیت بیانگر ایجاد شرایط مشابه حالت پایدار با توزیع یکنواخت نسبی حفرات و توزیع یکنواخت نسبی نانوذرات کاربید سیلیسیم در کامپوزیت می باشد که این نتایج با آزمونهای خزشی تایید شده است. همچنین آزمون رهاسازی تنش بیانگر کاهش سرعت رهاسازی تنش با افزایش زمان (کارسختی) و نقش تغییرات (کم) توزیع حفرات (به عبارتی نانوذرات) در تغییر نرخ رهاسازی تنش می باشد.

## واژه های کلیدی:

خزش فرورونده، خزش رهاسازی تنش، خزش فشاری، نانو کامپوزیت متخلخل.

## ۱- مقدمه

دلایل اقتصادی، زیست محیطی و افزایش کارایی، کامپوزیت های فلزی (به ویژه کامپوزیت های زمینه آلومینیوم) توسعه یافته و از مزایایی شامل کاهش وزن و افزایش هدایت در حرارتی بهره مند شده اند [۲-۳]. کامپوزیت های زمینه آلومینیوم تقویت شده با ذرات سرامیکی کاربید سیلیسیم از مزایای همزمان

نگاهی به پیشینه ساخت کامپوزیت ها، مربوط به ساخت آجرهای مقاوم جهت استفاده در بناها (تقویت با الیاف گیاهان) می باشد. این تفکر به ۳۰۰۰ سال پیش هنگامی که فراغنه مصر به منظور افزایش استحکام آجرها از الیاف گیاهان جهت بهبود استحکام استفاده می کردند مربوط می شود [۱]. در دهه های اخیر به

در پژوهش های انجام شده به ارتباط تنش فرورونده و تنش خزشی متداول با استفاده از نسبت سختی و استحکام تسلیم اشاره شده است و رابطه تنش فرورونده ( $\sigma_{punch}$ ) و تنش خزشی متداول ( $\sigma_{Uniaxial}$ ) با نسبت ( $C_1$ ) به یکدیگر مرتبط شده است (رابطه ۱). همچنین سرعت خزشی متداول ( $\epsilon^{\circ} Uniaxial$ ) با توجه به رابطه ۲ با نرخ فرورونده با ثابت  $C_2$  مرتبط شده است [۸].

$$\sigma_{punch} = C_1 \sigma_{Uniaxial} \quad (1)$$

$$\epsilon_{Uniaxial} = V_{impression} / C_2 d \quad (2)$$

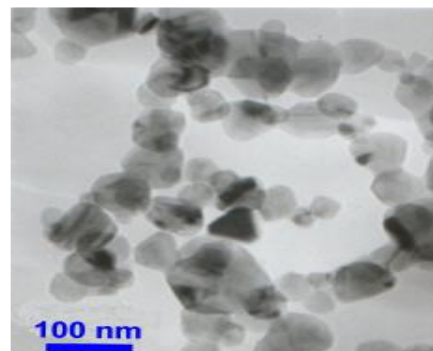
در رابطه ۱،  $\sigma_{punch}$ ، تنش فرورونده و  $\sigma_{Uniaxial}$  تنش خزشی متداول در نظر گرفته شده است. در رابطه ۲،  $V_{impression}$  نرخ فرورونده (عمق فرورونده برحسب زمان) و  $d$  قطر فرورونده در نظر گرفته شده است.

با توجه به مطالعات پیشین در مراجع [۹-۱۰] نسبت تنش فرورونده به تنش خزشی (فشاری یا کششی) برابر با ۳ و نسبت نرخ کرنش خزشی به نرخ عمق فرورونده نیز با در نظر گرفتن قطر فرورونده، ۱/۵-۰/۵ ارزیابی شده است. کیوانی و همکارانش [۹] برای آلیاژهای منیزیم با افزایش بیسموت این دو نسبت را ۳ و ۱ برآورد نموده است. در روشی دیگر (رها سازی تنش)، کرنش کل اعمال شده بر روی نمونه، ثابت نگاه داشته شده و تنش به آرامی آزاد می شود، در حالی که کرنش الاستیک به وسیله کرنش پلاستیک جایگزین می شود. بنابراین در کرنش ثابت، نرخ خزش برابر با نرخ کاهش کرنش الاستیک (رها سازی تنش) می باشد. با استفاده از دو آزمون خزش فرورونده و رها سازی تنش می توان سرعت خزش را در زمان کوتاهتر محاسبه نمود و این آزمونها می توانند به عنوان آزمونهای جایگزین آزمونهای متداول خزشی مطرح شوند [۱۱-۱۴].

زمینه سبک و استحکام فاز سرامیکی بهره مند شده اند [۴-۶]. در کامپوزیت های زمینه فلزی و نیز زمینه آلومینیوم، روش های تولید بر مبنای توزیع یکنواخت فاز تقویت کننده، برآورد اقتصادی، نوع و شکل فاز تقویت کننده و تناسب با کاربرد، به دو گروه فرایندهای حالت مذاب و فرایندهای حالت جامد تقسیم می شوند [۱-۴]. در فرایندهای حالت مذاب از افزودن فاز تقویت کننده به مذاب زمینه فلزی استفاده می شود. در فرایندهای حالت جامد اختلاط اجزاء توسط روش های حالت جامد انجام می گیرد. به عنوان مثال در روش متالورژی پودر از اختلاط دو جزء و فشردن آنها و اعمال حرارت در اتمسفر کنترل شده استفاده می شود [۲]. از مزایای این روش تولید قطعات با حداکثر دقت ابعادی، کاهش هزینه، عدم لزوم فرایندهای ماشینکاری، امکان توزیع یکنواخت فاز تقویت کننده (در حجم بالا)، امکان حذف تخلخل در فرایندهای فشردن سازی و امکان تولید قطعات در مواردی که تولید با روش های ریخته گری امکان پذیر نیست، می باشد. به این منظور روش آلیاژ سازی مکانیکی به معنای اختلاط پودرهای اولیه در آسیاب مکانیکی و برخورد مکانیکی مواد با گلوله های آسیابکاری (انرژی بالا) مورد توجه قرار گرفته است [۲ و ۴ و ۶]. این روش در رابطه با نانوذرات تقویت کننده با دستیابی به شرایط حالت پایدار (تعادل مکانیزمهای جوش سرد و شکست) که توزیع یکنواختی از فاز تقویت کننده نانو در کامپوزیت همراه با ریز شدن دانه های فاز زمینه در این فرایند حاصل می شود دارای اهمیت می باشد [۴-۶]. خزش در مواد به معنای قابلیت تغییر فرم پلاستیک با تغییرات زمان می باشد [۷]. تعیین خواص خزشی نمونه های کامپوزیتی با روش خزش فشاری یا کششی به زمان زیادی نیاز دارد. بنابراین با انجام آزمونهای خزش فرورونده تعیین این خواص با صرف زمان کمتری انجام می شود [۸-۱۰]. این روش با توجه به اعمال نیرو به نمونه توسط فرورونده که با نگهدارنده مهار شده است و کنترل دمای کوره می توان روند تغییرات عمق فرورونده در نمونه با گذشت زمان را تعیین نمود. [۹].

## ۲- روش تحقیق

در این پژوهش از پودر آلومینیوم با قطر ذرات کمتر از ۴۵ میکرون تولید شده به روش افشانش گاز به عنوان ماده زمینه استفاده شده است. همچنین از تقویت کننده پودر نانوذرات کاربید سیلیسیم با قطر ۶۰ نانومتر (شکل ۱) و پودر استاریک اسید با خلوص ۹۷/۵٪ استفاده شده است. تولید کامپوزیت آلومینیوم تقویت شده با نانوذرات SiC در طی مراحل ذیل انجام شده است: در گام نخست، از آسیاب ماهواره‌ای به منظور اختلاط پودرهای Al و نانوذرات SiC و استاریک اسید به عنوان عامل کنترل کننده فرایند استفاده شد. آسیابکاری در گاز آرگون با خلوص (۹۹/۹۹۹) بر روی کامپوزیت تقویت شده با ۴ درصد حجمی کاربید سیلیسیم با استفاده از گلوله‌های فولادی به قطر ۱۰ میلیمتر و با شدت آسیابکاری ۲۶۰ rpm، نسبت گلوله به پودر ۱۵ و زمان ۴ ساعت و ۲ درصد استاریک اسید انجام شد. پودرهای کامپوزیتی پس از تولید با استفاده از سنبه و ماتریس و با استفاده از پرس با ظرفیت ۱۵ تن (Zwick۱۴۹۶-۲ d) و به صورت اعمال تنش تدریجی ۶۲۰ تا ۰ مگاپاسکال فشرده شده و تحت گاز آرگون (خلوص ۹۹/۹۹۹٪) به مدت ۱ ساعت تفجوشی شده و این فرایند به منظور کاهش حفرات موجود در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد انجام گرفت. تعیین چگالی نمونه های تولید شده (روش تولید مناسب) با روش ارشمیدس انجام گرفت. به منظور ارزیابی نقش نانوذرات در فرایند آلیاژسازی مکانیکی نمونه های تولید شده از پودر حاصل از فرایند پس از پرس و تفجوشی با میکروسکوپ نوری مورد آزمون قرار گرفت.



شکل (۱): تصویر میکروسکوپ عبوری پودر نانوذره کاربید سیلیسیم

## ۲-۱- آزمون های خزش

### ۲-۱-۱- آزمون های خزش فشاری

آزمون های خزش فشاری در دمای ۴۵۰°C و در تنش ۳۰ مگاپاسکال (سه نمونه با اختلاف چگالی کمتر از ۴ درصد)، ۳۲/۵ مگاپاسکال (سه نمونه با اختلاف چگالی کمتر از ۲ درصد) و ۳۵ مگاپاسکال (سه نمونه با اختلاف چگالی کمتر از ۷ درصد) بر روی نمونه هایی به قطر ۱۰ میلیمتر و ارتفاع ۱۰ میلیمتر با استفاده از دستگاه SANTAM (STM150) انجام شده است. سرعت انجام آزمون در موارد فوق (ثانیه/۱)  $10^{-4} \times 10^{-3}$  بوده است. به منظور بررسی مدول الاستیک آزمون تنش- کرنش فشاری بر روی نمونه ای شاهد با سرعت کرنش (ثانیه/۱)  $10^{-4} \times 10^{-3}$  در دمای ۴۵۰ درجه سانتیگراد انجام شده است. نمونه شاهد نمونه انتخاب شده از پودر تقویت شده با ۴ درصد حجمی تقویت کننده بود. این نمونه با روش پرس تدریجی (۶۲۰ تا ۰) و تفجوشی در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد تولید شد. قطر و ارتفاع نمونه ۱۰ میلیمتر و چگالی نسبی ۸۸ درصد به دست آمده است.

### ۲-۱-۲- آزمون های خزش فرو رونده

نمونه های ۴-۴٪ Al-SiC به قطر ۱۰ میلیمتر و ارتفاع ۵ میلیمتر تولید شده و آزمون های خزش فرو رونده با استفاده از دستگاه SANTAM (STM150) با فرو رونده ای به قطر ۲ میلیمتر در تنش ثابت ۹۰ (سه نمونه با اختلاف چگالی کمتر از ۴ درصد)، ۹۷ (سه نمونه با اختلاف چگالی کمتر از ۲ درصد)، ۱۱۱ (سه نمونه با اختلاف چگالی کمتر از ۳ درصد) و ۱۲۰ مگاپاسکال (سه نمونه با اختلاف چگالی کمتر از ۴ درصد) انجام گرفت. دمای انجام آزمونها ۴۵۰ درجه سانتیگراد بود. سرعت انجام آزمون در موارد فوق (ثانیه/۱)  $10^{-3} \times 10^{-3}$  بود.

### ۲-۱-۳- آزمون های رها سازی تنش

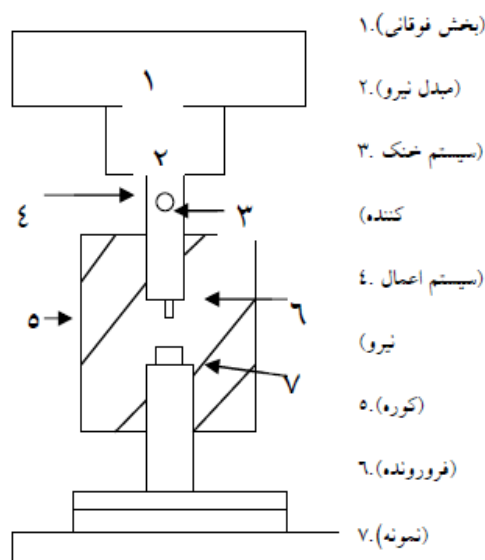
به منظور بررسی آزمون رها سازی تنش به مقدار مشخصی از عمق فرو رونده (۰/۵ میلیمتر) بر روی نمونه های تولید شده (قطر ۱۰ میلیمتر و ارتفاع ۵ میلیمتر) اعمال شد. عمق فرو رونده ثابت نگاه داشته شد و تنش اعمال شده رها شد. هم زمان نمودار

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- نتایج آزمون های خزش فشاری انجام شده بر روی نمونه های کامپوزیتی

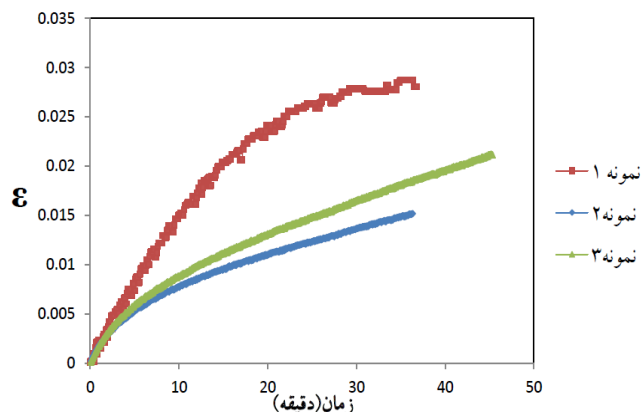
در پژوهش حاضر سه تنش ۳۰، ۳۲/۵ و ۳۵ مگاپاسکال برای تعیین خواص خزشی نمونه حاصل از پودر تولیدی در نظر گرفته شده است. ارزیابی سه نمونه در هر تنش میانگینی از رفتار پودر تولید شده، پرس و تفجوشی شده در تنش مورد نظر را بیان می کند. شکل ۳ نتایج آزمون های خزش فشاری انجام شده بر روی نمونه های کامپوزیتی را نشان می دهد. آزمونها در نمونه های متخلخل نانوکامپوزیتی مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به شکل ۳ می توان سرعت خزش پایدار را تعیین نموده و در محاسبات مورد توجه قرار داد. در شکل ۳ که نمودارهای کرنش بر حسب زمان را نشان می دهد، نواحی منطقه اول خزشی و منطقه دوم خزشی کاملاً قابل ارزیابی بوده و می توان ناحیه خطی منحنی را به عنوان ناحیه پایدار در نظر گرفته که تعادل بین مکانیزمهای کار سختی و بازیابی را نشان می دهد [۷]. سرعت خزش پایدار محاسبه شده در شکل های ۳(الف-ج) در جدول ۱(الف-ج) نشان داده شده است. همچنین میکروساختار و توزیع حفرات در نمونه های مختلف حاصل از فرایند آلیاژسازی مکانیکی، پرس و تفجوشی در شکل ۴ نشان داده شده است.

تغییرات نیرو با زمان ترسیم شد. این آزمون با سرعت کرنش اولیه (ثانیه<sup>-۳</sup>)  $10^{-3} \times 1/7$  و در دمای ۴۵۰ درجه سانتیگراد و بر روی سه نمونه با اختلاف چگالی کمتر از ۲ درصد انجام گرفت. شکل ۲، تصویر شماتیک دستگاه خزش فرو رونده (در آزمون های رهاسازی و فرو رونده) را نشان داده است.

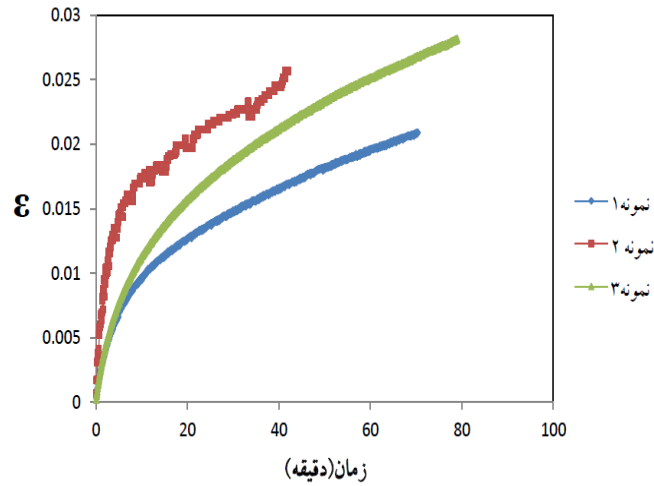


شکل (۲): شکل شماتیک دستگاه خزش فرو رونده

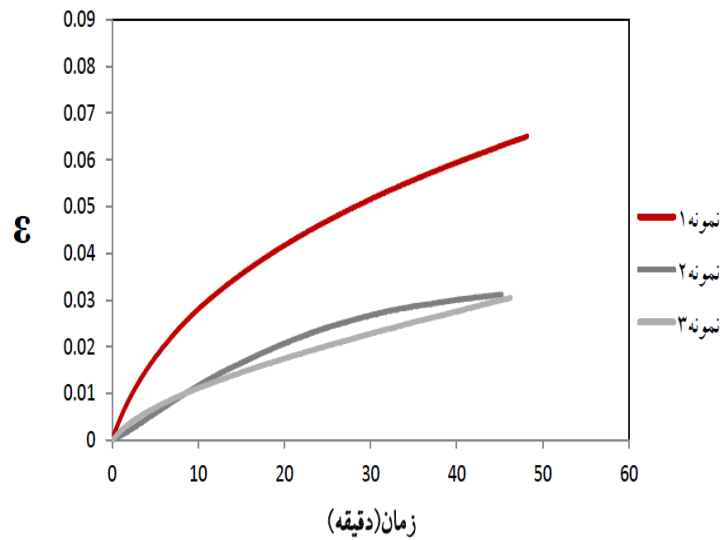
نتایج بر مبنای نیرو بر حسب زمان (آزمون رهاسازی تنش) و تغییر طول نمونه بر حسب زمان (خزش فشاری و خزش فرورونده) اندازه گیری شد.



شکل (۳): (الف): تغییرات کرنش خزشی بر حسب زمان برای کامپوزیت ۴ vol.% SiC در دمای ۴۵۰ درجه سانتیگراد و در تنش ۳۰ مگاپاسکال. سه نمونه با اختلاف چگالی کمتر از ۴ درصد از پودر تولیدی تحت آزمون قرار گرفته اند



شکل (۳): (ب): تغییرات کرنش خزشی بر حسب زمان برای کامپوزیت ۴ vol.% SiC در دمای ۴۵۰ درجه سانتیگراد و در تنش ۳۲/۵ مگاپاسکال. سه نمونه با اختلاف چگالی کمتر از ۲ درصد از پودر تولید شده تحت آزمون قرار گرفته اند



شکل (۳): (ج): تغییرات کرنش خزشی بر حسب زمان برای کامپوزیت ۴ vol.% SiC در دمای ۴۵۰ درجه سانتیگراد و در تنش ۳۵ مگاپاسکال. سه نمونه با اختلاف چگالی کمتر از ۷ درصد از پودر تولید شده تحت آزمون قرار گرفته اند

جدول (۱): (الف): سرعت خزشی پایدار فشاری در سه نمونه که با اختلاف چگالی کمتر از ۴ درصد از پودر تولید شده تحت آزمون قرار گرفته اند

نمونه	تنش فشاری (مگاپاسکال)	نرخ خزش فشاری (ثانیه/۱)	$\epsilon \times 10^{-6}$ میانگین (ثانیه/۱)
۱	۳۰ (چگالی ۸۸٪)	$3/3 \times 10^{-6}$	
۲	۳۰	$5 \times 10^{-6}$	۴/۴
۳	۳۰	$5 \times 10^{-6}$	

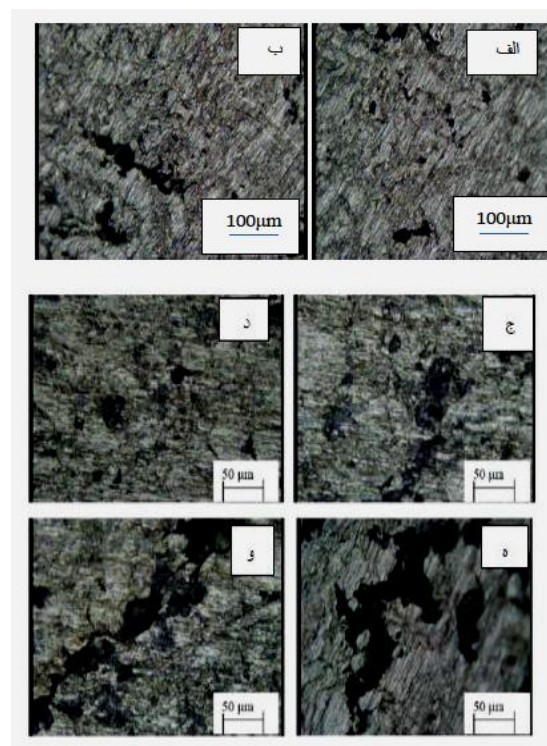
جدول (۱) (ب): سرعت خزشی پایدار فشاری در سه نمونه که با اختلاف چگالی کمتر از ۲ درصد از پودر تولید شده تحت آزمون قرار گرفته اند

نمونه	تنش فشاری (مگاپاسکال)	نرخ خزش فشاری (ثانیه/۱)	$10^{-6} \times$ میانگین (ثانیه/۱)
۱	(چگالی ۸۸٪) ۳۲/۵	$3/3 \times 10^{-6}$	۳/۳
۲	۳۲/۵	$3/3 \times 10^{-6}$	۳/۳
۳	۳۲/۵	$3/3 \times 10^{-6}$	۳/۳

جدول (۱) (ج): سرعت خزشی پایدار فشاری در سه نمونه که با اختلاف چگالی کمتر از ۷ درصد از پودر تولید شده تحت آزمون قرار گرفته اند

نمونه	تنش فشاری (مگاپاسکال)	نرخ خزش فشاری (ثانیه/۱)	$10^{-6} \times$ میانگین (ثانیه/۱)
۱	(چگالی ۸۴٪) ۳۵	$12 \times 10^{-6}$	۸/۴
۲	۳۵	$5 \times 10^{-6}$	۸/۴
۳	(چگالی ۸۶٪) ۳۵	$8/3 \times 10^{-6}$	۸/۴

نمود. در این فرایند از پودر آلومینیوم به عنوان زمینه و از نانوذرات کاربید سیلیسیم به عنوان تقویت کننده استفاده شده است. پودرهای آلومینیوم و نانوذرات کاربید سیلیسیم در آسیاب با شدت بالا مخلوط شده، با گذشت زمان جوش و سپس شکسته می شوند. به عبارتی اندازه ذرات پودر کامپوزیتی حاصل از فرایند با گذشت زمان کوچکتر و یکنواخت تر می شود. به بیان دیگر فرایند آلیاژسازی مکانیکی تحت تاثیر سه مکانیزم تغییر فرم پلاستیک، جوش سرد و شکست پیش می رود. در ابتدا تغییر فرم پلاستیک ذرات پودر آلومینیوم در اثر برخورد های مکانیکی در حین آسیابکاری اتفاق افتاده سپس فرایند جوش سرد ذرات پودر آلومینیوم و پس از گذشت زمانی خاص در اثر کارسختی پودر آلومینیوم و پخش ذرات کاربید سیلیسیم در آن شکست اتفاق می افتد. هنگامی که سرعت جوش و شکست در فرایند برابر شود اندازه ذرات پودر کامپوزیتی ثابت می شود. این شرایط به شرایط حالت پایدار اطلاق می شود. در این شرایط توزیع یکنواختی از فاز ثانویه در زمینه (همراه با حداکثر ریز شدن دانه های فاز زمینه) اتفاق افتاده است [۱-۴ و ۶]. پس از تولید نمونه های حاصل از آلیاژسازی مکانیکی فرایند پرس و تفجوشی و بسته شدن حفرات بزرگ ناشی از ذرات درشت تر



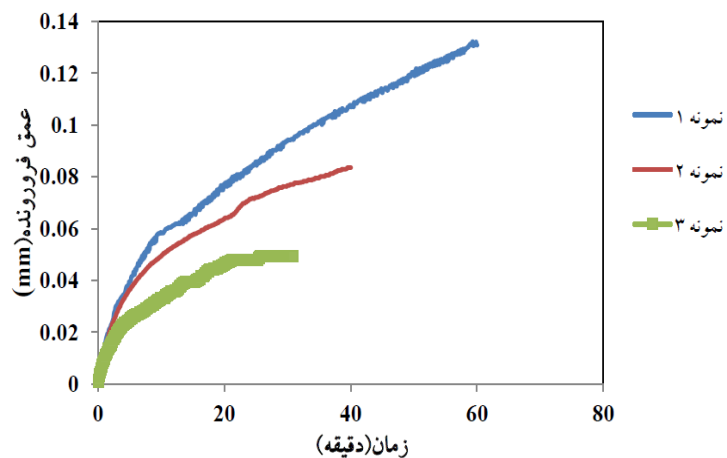
شکل (۴): تصاویر میکروسکوپ نوری از نمونه های مختلف تولید شده از روش آلیاژسازی مکانیکی: (الف و ب): تخلخل کم، (ج و د): تخلخل کم و (ه و و): تخلخل بیشتر

با توجه به شکل ۴ می توان تغییرات شکل و اندازه حفرات را در نمونه های مختلف حاصل از فرایند آلیاژسازی مکانیکی مشاهده

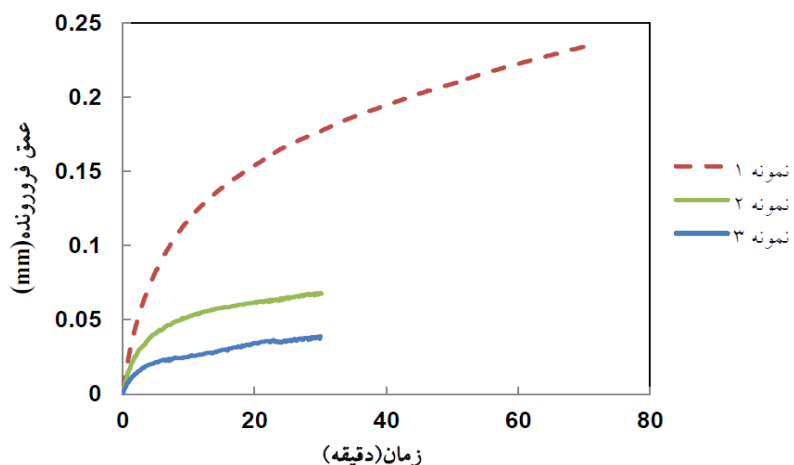
### ۳-۲- بررسی تاثیر تنش بر سرعت خزش فرو رونده در نمونه های کامپوزیتی

در پژوهش حاضر به منظور انجام آزمون های خزش فرورونده چهار تنش ۹۰، ۹۷، ۱۱۱ و ۱۲۰ مگاپاسکال مورد آزمون قرار گرفت. هر یک از تنش های آزمون های فرورونده (۹۰ و ۹۷ و ۱۱۱ مگاپاسکال) به صورت مضرب ۳ از تنش های آزمون های خزش فشاری (۳۰ و ۳۲/۵ و ۳۵ مگاپاسکال) در نظر گرفته شده است. در نمونه های تنش های ۱۱۱ و ۱۲۰ مگاپاسکال در هر تنش، دو نمونه در نظر گرفته شده است. در تنش ۱۱۱ مگاپاسکال (نمونه ۲) و ۱۲۰ مگاپاسکال (نمونه ۲) دو سرعت خزشی پایدار به دست آمده است (پیکان های شکل ۵ (ج) و ۵ (د)). این امر می تواند ناشی از تنش بالای فرورونده و افزایش نرخ کارسختی نمونه و تغییرات ریزساختاری نمونه باشد. نتایج سه آزمون در هر تنش میانگینی از رفتار پودر تولید شده، پرس و تفجوشی شده در تنش مورد نظر را نشان می دهد. نتایج آزمون های خزش فرو رونده در چهار تنش مختلف ۹۰، ۹۷، ۱۱۱ و ۱۲۰ مگاپاسکال در شکل های ۴ (الف-د) نشان داده شده است. با توجه به اشکال ۵ (الف-د)، رفتار خزشی مشابه با رفتار خزش فشاری، مشاهده شد و ناحیه پایدار (سرعت خزش پایدار) در تنش های مختلف و نمونه های مختلف، به وضوح مشخص می شود. این امر بیانگر تغییر فرم پایدار در نمونه و بنابراین امکان ایجاد تعادل بین مکانیزمهای کار سختی و بازیابی فراهم می شود [۸-۱۰]. در هر تنش سرعت خزش فرورونده محاسبه شده و در جداول ۲ و ۳ نشان داده شده است.

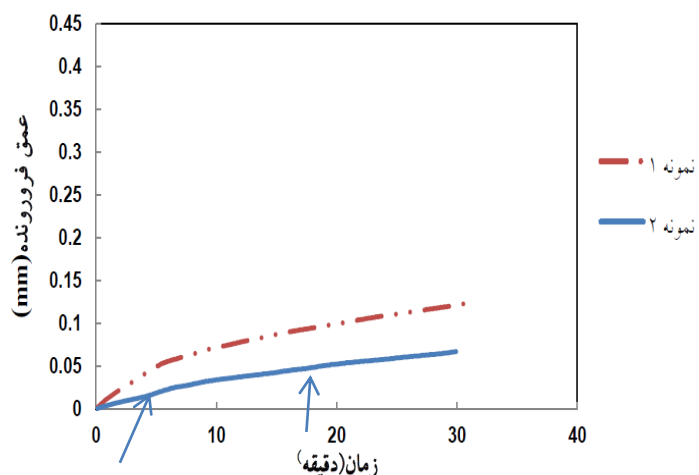
پودر کامپوزیتی کامل نشده است. در حالی که در پودرهای ریزتر با حفرات کوچکتر تفجوشی کامل شده است. بنابراین پودرهای درشت تر منجر به تولید حفرات بزرگتر در نمونه (شکل ۴ (ه و و)) و پودرهای کامپوزیتی با ذرات کوچکتر منجر به تولید حفرات کوچکتر در نمونه یا نمونه هایی با تخلخل کمتر (شکل ۴ (الف-د)) می شوند. توزیع غیریکنواخت ذرات پودر حاصل از فرایند آلیاژسازی مکانیکی منجر به غیریکنواختی توزیع حفرات در نمونه های حاصل از پرس و تفجوشی می شود. بنابراین در نمونه های شکل ۴ (الف-د) توزیع ریزتر و یکنواخت تری از ذرات پودر کامپوزیتی در مقایسه با شکل های ۴ (ه و و)) به وجود آمده است. از طرفی در نمونه های جدول های ۱ (الف) و (ب)) با توجه به تغییر کم سرعت خزش نمونه ها، پارامترهای درصد حفرات و توزیع ذرات کاربید سیلیسیم و اندازه دانه های فاز زمینه که در سرعت خزشی پایدار موثر می باشند [۷، ۱۵-۱۶]، در نمونه های مختلف تغییرات کمی را نشان می دهد. پس در سه نمونه در هر تنش (جدول های ۱ (الف) و (ب)) تغییرات کم سرعت خزشی پایدار، بیانگر تغییرات کم تخلخل می باشد. می توان توزیع ریزساختاری حفرات در سه نمونه در جداول (الف و ب) را مشابه شکل (الف-د) ارزیابی نمود. در نمونه های متخلخل (جدول ۱ (ج) یا شکل ۴ (ه و و)) می توان نقش درصد تخلخل را در افزایش سرعت کرنش خزشی مشاهده نمود [۷]. با توجه به اینکه، تجمع ذرات تقویت کننده، افزایش درصد و اندازه تخلخل می تواند منجر به افزایش سرعت خزش فشاری گردد [۷، ۱۵-۱۶]. بنابراین در نمونه های تحت آزمون در تنشهای ۳۰ و ۳۲/۵ مگاپاسکال، تغییرات کم درصد تخلخل و غیریکنواختی توزیع ذرات فاز ثانویه تغییری در نتایج سرعت خزشی نداشته است. با توجه به تاثیر حفرات در خزش نفوذی، نفوذ مرز دانه ای و شبکه ای، در صورت وجود حفرات با ابعاد بزرگتر (شکل ۴ (ه و و)) به دلیل کاهش فاصله نفوذ و افزایش سرعت نفوذ، فرایند خزش، با سرعت بیشتری انجام خواهد شد و سرعت خزش افزایش خواهد یافت. بنابراین نمونه های متخلخل در جدول ۱ (ج) سرعت کرنش بالاتری خواهند داشت [۷].



شکل (۵): (الف): تغییرات عمق فرو رونده به عنوان تابعی از زمان در تنش ۹۰ مگاپاسکال. سه نمونه با اختلاف چگالی کمتر از ۴ درصد از پودر تولید شده تحت آزمون قرار گرفته اند

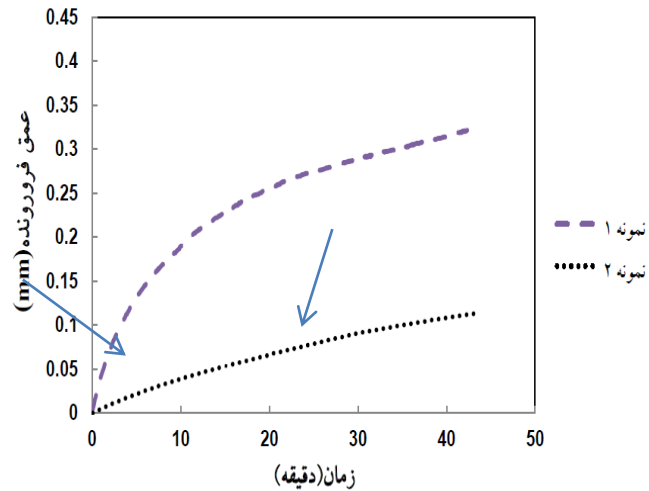


شکل (۵): (ب): تغییرات عمق فرو رونده به عنوان تابعی از زمان در تنش ۹۷ مگاپاسکال. سه نمونه با اختلاف چگالی کمتر از ۲ درصد از پودر تولید شده تحت آزمون قرار گرفته اند



شکل (۵): (ج): تغییرات عمق فرورونده به عنوان تابعی از زمان در تنش ۱۱۱ مگاپاسکال. دو نمونه با اختلاف چگالی کمتر از ۳ درصد از پودر تولید شده تحت آزمون قرار گرفته اند. پیکانها نشان دهنده دو ناحیه خطی با سرعت خزش پایدار متفاوت می باشند.





شکل (۵): (د): تغییرات عمق فرو رونده به عنوان تابعی از زمان در تنش ۱۲۰ مگاپاسکال. دو نمونه با اختلاف چگالی کمتر از ۴ درصد از پودر تولید شده تحت آزمون قرار گرفته اند. پیکانها نشان دهنده دو ناحیه خطی با سرعت خزش پایدار متفاوت می باشند

۰/۷ [۱۸] و در آلیاژ AZRC91 (آلیاژ منیزیم) مقدار  $C_1$  برابر ۳ و مقدار  $C_2$  برابر ۰/۵ [۱۹] ارزیابی شده است. در این مطالعات رابطه بین سرعت خزشی در آزمون کشش و آزمون خزش فرورونده به دست آمده است. در پژوهش حاضر (نانوکامپوزیت متخلخل) و در آزمون های مختلف مقادیر  $C_2$  در جداول ۴ و ۵ محاسبه شده است. مقدار  $C_1$  با توجه به نسبت سختی به استحکام تسلیم فلزات خالص ۳ در نظر گرفته شده است. در مراجع مختلف با فرض  $C_1$  برابر ۳ مقدار  $C_2$  برابر ۱ (در بازه ۱/۵ تا ۰/۵) قرار گرفته است. با توجه به اینکه چگالی نمونه های تولید شده مقدار بالایی می باشد و نیز با توجه به آزمون های انجام شده این فرض در نظر گرفته شده است [۸-۱۳].

با توجه به اشکال فوق می توان سرعت خزش در ناحیه پایدار را محاسبه نمود و با نتایج آزمون خزش فشاری مقایسه نمود. با توجه به مطالعات انجام شده [۸-۱۳]، به منظور انطباق آزمون خزش فرورونده و خزش فشاری (Uniaxial) با توجه به روابط ۳ و ۴، محاسبه ثوابت  $C_1$  و  $C_2$  حائز اهمیت است.

$$\sigma_{impression} = C_1 \sigma_{Compression} \quad (۳)$$

$$\epsilon^{\circ Uniaxial} = \frac{dh}{dt} \left( \frac{1}{d C_2} \right) \quad (۴)$$

در این رابطه  $\sigma_{Compression}$ ، تنش فشاری،  $\sigma_{impression}$ ، تنش فرو رنده،  $\frac{dh}{dt}$  تغییرات عمق فرورونده،  $d$  قطر فرورونده،  $C_1$  و  $C_2$  ثوابت به دست آمده می باشد. به عنوان نمونه در آلیاژهای منیزیم با افزودنی بیسموت ثابت  $C_1$  برابر ۳ و ثابت  $C_2$  برابر ۱ [۱۷] و در AZ31 (آلیاژ منیزیم) مقدار  $C_1$  برابر ۳ و  $C_2$  برابر

جدول (الف): نرخ عمق فرورونده در تنش ۹۰ مگاپاسکال و در دمای ۴۵۰ درجه سانتیگراد. سه نمونه با اختلاف چگالی کمتر از ۴ درصد از پودر تولید شده تحت آزمون قرار گرفته اند

نمونه	چگالی (%)	تنش فرورونده (MPa)	نرخ عمق فرورونده (mm/s) ( $\times 10^{-5}$ )	میانگین (mm/s) ( $\times 10^{-5}$ )
۱	۸۸/۵	۹۰	۲/۵	۲/۲
۲	۸۸/۵	۹۰	۱/۷	
۳	۸۸/۵	۹۰	۲/۳	

جدول (۲ب): نرخ عمق فرورونده در تنش ۹۷ مگاپاسکال و در دمای ۴۵۰ درجه سانتیگراد. سه نمونه با اختلاف چگالی کمتر از ۲ درصد از پودر تولید شده تحت آزمون قرار گرفته اند

نمونه	چگالی (%)	تنش فرورونده (MPa)	نرخ عمق فرورونده (mm/s) ( $\times 10^{-5}$ )	میانگین (mm/s) ( $\times 10^{-5}$ )
۱	۸۸/۵	۹۷	۲/۲	۱/۶
۲	۹۰	۹۷	۱/۳	
۳	۹۰	۹۷	۱/۲	

جدول (۳الف): نرخ عمق فرورونده در تنش ۱۱۱ مگاپاسکال و در دمای ۴۵۰ درجه سانتیگراد. دو نمونه با اختلاف چگالی کمتر از ۳ درصد از پودر تولید شده و با تغییرات ریزساختاری در نمونه دوم تحت آزمون قرار گرفته اند

نمونه	چگالی (%)	تنش فرورونده (MPa)	نرخ عمق فرورونده (mm/s) ( $\times 10^{-5}$ )	میانگین (mm/s) ( $\times 10^{-5}$ )
۱	۸۸	۱۱۱	۴/۵	۴/۴
۲	۸۵	۱۱۱	۶	
۲	۸۵	۱۱۱	۲/۸	

جدول (۳ب): نرخ عمق فرورونده در تنش ۱۲۰ مگاپاسکال و در دمای ۴۵۰ درجه سانتیگراد. دو نمونه با اختلاف چگالی کمتر از ۴ درصد و با تغییرات ریزساختاری در نمونه دوم تحت آزمون قرار گرفته اند

نمونه	چگالی (%)	تنش فرورونده (MPa)	نرخ عمق فرورونده (mm/s) ( $\times 10^{-5}$ )	میانگین (mm/s) ( $\times 10^{-5}$ )
۱	۸۸	۱۲۰	۴/۸	۴/۱
۲	۸۸	۱۲۰	۴/۵	
۲	۸۸	۱۲۰	۳	

با توجه به نتایج جداول ۲ و ۳ نتایج خزش فرورونده نمونه کامپوزیتی در تنش ۹۰ و ۹۷ و ۱۲۰ مگاپاسکال در سه نمونه در هر تنش اختلافات کمی را نشان میدهد و در نمونه های تحت تنش ۱۱۱ مگاپاسکال به دلیل وجود نمونه با حفرات بیشتر (ساختاری مشابه شکل (۴) ه و و)) سرعت خزش متغیر و بالاتری را نشان می دهد. به عبارتی با وجود تفاوت های ساختاری در نمونه ها می توان شرایط مشابه حالت پایدار در روش آلیاژسازی مکانیکی در کامپوزیت زمینه آلومینیوم تقویت شده با ۴ درصد حجمی نانوذرات کاربید سیلیسیم را با توجه به نتایج فوق برآورد نمود.

جدول (۴): نرخ عمق فرورونده به صورت تابعی از تنش و ارزیابی ثابت  $C_p$  در تنشهای خزش فشاری ۳۰ و ۳۲/۵ مگاپاسکال

نمونه	تنش فرورونده (MPa)	نرخ عمق فرورونده (mm/s) ( $\times 10^{-5}$ )	$\sigma_{\text{compression}}=30 \text{ MPa}$ $C_p$	$\sigma_{\text{compression}}=32/5 \text{ MPa}$ $C_p$
۱	۹۰	۲/۲	$C_1=3(2/5)$	۳/۳
۲	۹۷	۱/۶	۱/۸	$C_1=3(2/4)$
۳	۱۱۱	۴/۴	۵	۶/۷
۴	۱۲۰	۴/۱	۴/۶	۶/۲

جدول (۵): نرخ عمق فرورونده به صورت تابعی از تنش و ارزیابی ثابت  $C_p$  در تنش خزش فشاری ۳۵ مگاپاسکال

نمونه	تنش فرورونده (MPa)	نرخ عمق فرورونده (mm/s) ( $\times 10^{-5}$ )	$\varepsilon^{\circ} = \left(\frac{1}{Cd}\right) \left(\frac{dh}{dt}\right)$ $C_p$
۱	۹۰	۲/۲	۱/۳
۲	۹۷	۱/۶	۰/۹۵
۳	۱۱۱	۴/۴	۲/۶
۴	۱۲۰	۴/۱	۲/۴

فرورونده به مقدار ۱۱۱ و ۱۲۰ مگاپاسکال با توجه به افزایش نرخ خزش فرورونده ضریب به مقادیر ۵ و ۴/۶ برای تنش ۳۰ مگاپاسکال و مقدار ۶/۷ و ۶/۲ برای تنش ۳۲/۵ مگاپاسکال تغییر نموده است. به عبارتی نرخ خزش فرورونده در تنش های ۱۱۱ و ۱۲۰ مگاپاسکال بالاتر از نرخ خزش فشاری در تنش های ۳۰ و ۳۲/۵ مگاپاسکال می باشد. در رابطه با نمونه های متخلخل (جدول ۱ ج) و شکل ۴) به دلیل نقش حفرات در نرخ خزش فشاری و افزایش نرخ خزش فشاری این ثابت تغییر نموده و در تنش های فرورونده ۹۰ و ۹۷ مگاپاسکال به عدد ۱ و در تنش های ۱۱۱ و ۱۲۰ مگا پاسکال به مقدار ۲/۴ نزدیک می شود. به عبارتی هنگامی که تنش خزش فرورونده (۱۱۱ مگاپاسکال) به صورت مضرب سه نسبت به تنش فشاری در تنش ۳۵ مگاپاسکال تغییر می کند با توجه به چگالی ۸۵ درصد در نمونه تنش فشاری ۳۵ مگاپاسکال و ۱۱۱ مگاپاسکال (مشابهت در چگالی) ثابت  $C_p$  برابر با ۲/۶ و برابر با ثوابت تنش های ۳۰ (۲/۵) و ۳۲/۵ (۲/۴) به دست می آید. پس می توان نتیجه گیری نمود که با تغییر تنش و چگالی نمونه ها ثابتی برابر با ۲/۵ در

با توجه به نتایج جدول ۴، ثابت  $C_p$ ، با سه برابر نمودن تنش خزش فشاری ۳۰ و ۳۲/۵ مگاپاسکال (تنش خزش فرورونده ۹۰ و ۹۷ مگاپاسکال)، ۲/۵ و ۲/۴ محاسبه شده است (نتایج آزمون ها به صورت میانگین حاصل از سه نمونه با وجود تفاوت های ساختاری و وجود حفرات در نمونه ها محاسبه شده است). با توجه به ضریب بالای به دست آمده (۲) در مقایسه با مراجع که ۱ یا کمتر می باشد [۹-۱۰ و ۱۸] نقش موثر حفرات در مقایسه با نانوذرات در افزایش نرخ خزش فرورونده ثابت می شود. به عبارتی در کامپوزیت متخلخل تقویت شده با نانوذرات کاربید سیلیسیم نقش حفرات در مقایسه با نانوذرات کاربید سیلیسیم و اکسیدهای حاصل از اکسیداسیون پودر کامپوزیتی پس از آسیابکاری به روشنی با استفاده از این نتایج (ضریب بالای ۲) مشخص می شود. در مراجع عنوان شده با توجه به نقش ترکیبات بین فلزی مکانیزم خزش نابجایی فعال است. ضریب پایین تر به دست آمده (۱ یا کمتر) در این مراجع تاییدی بر نقش ترکیبات بین فلزی در فعال نمودن خزش نابجایی (لغزش و صعود) است [۹-۱۰، ۱۳، ۱۸]. همچنین با توجه به جدول ۴ با افزایش تنش

۱۰×۱/۷) سرعت اعمال نیرو قبل از رهاسازی تنش) در نظر گرفته شد.

با توجه به مراجع موجود و روابط ذیل روش رهاسازی تنش به منظور محاسبه نرخ کرنش به کار رفته است [۱۱-۱۲].

$$\varepsilon_t = \varepsilon_e + \varepsilon_a + \varepsilon_p \quad (5)$$

$$\varepsilon_t = \varepsilon_e + \varepsilon_i \quad (6)$$

$$\frac{d\varepsilon_i}{dt} = \frac{-d\varepsilon_e}{dt} = \frac{-1}{E} \frac{d\sigma}{dt} \quad (7)$$

با توجه به رابطه ۵ می‌توان کرنش کل اعمال شده را به کرنش الاستیک ( $\varepsilon_a$ )، کرنش پلاستیک ( $\varepsilon_p$ ) و کرنش الاستیک وابسته به زمان ( $\varepsilon_e$ ) تقسیم‌بندی نمود و مجموع کرنش پلاستیک و کرنش الاستیک را  $\varepsilon_i$  (inelastic) نامید. در رابطه ۷، نرخ کرنش خزشی ( $\dot{\varepsilon}_i$ ) به تغییرات تنش ( $\sigma$ ) با زمان ( $t$ ) مرتبط شده است.  $E$  مدول الاستیک ماده مورد نظر می‌باشد. اشکال ۵ و ۶ نمودارهای رهاسازی تنش (شکل ۶ آزمون‌های انجام شده در پژوهش حاضر و شکل ۷ شکل مرجع روش رهاسازی تنش) را نشان می‌دهد. بنابراین شیب ناحیه خطی در نمودار ذیل (شکل ۶) بیانگر سرعت خزشی پایدار در نمونه مورد نظر می‌باشد. جدول ۶ سرعت رهاسازی تنش در ناحیه خطی (سرعت خزشی پایدار) در سه نمونه با توزیع فاز نانوذره و حفرات متفاوت را نشان می‌دهد.

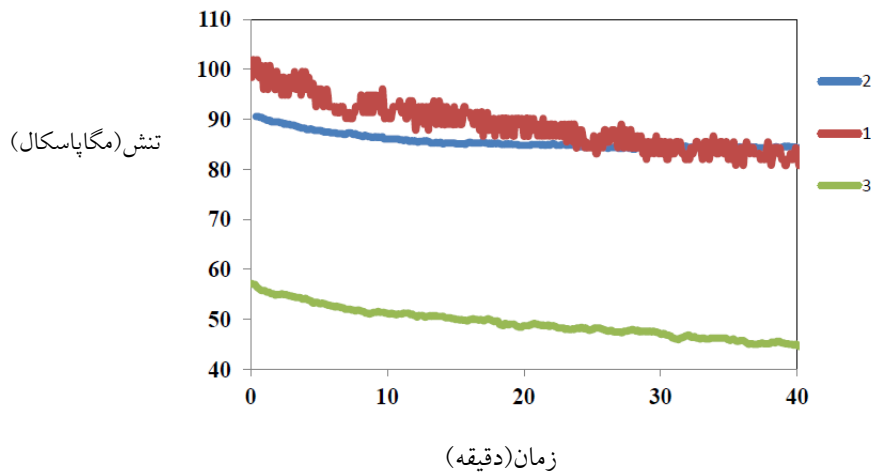
نمونه‌های مختلف مرتبط کننده نرخ خزش فشاری و نرخ خزش فرورونده در این نانوکامپوزیت به دست می‌آید. اگرچه تفاوت‌های ساختاری (توزیع فاز ثانویه و حفرات) منجر به بروز تفاوت‌هایی در آزمون‌های مختلف شده اما نتایج شامل اختلافات کمی می‌باشد و ضریبی ثابت را اثبات نموده که با تغییر تنش خزش فرورونده به مقدار سه برابر (۹۰ و ۹۷ و ۱۱۱ مگاپاسکال) در رابطه با تنش فشاری (۳۰ و ۳۲/۵ و ۳۵ مگاپاسکال) نرخ خزش فرورونده در مقایسه با سرعت خزش فشاری با ثابت (C<sub>r</sub>) برابر با ۲ تغییر نموده است. به دلیل تفاوت‌های ساختاری در کامپوزیت تقویت شده با نانوذرات (شکل ۴) افزایش تنش از ۱۱۱ مگاپاسکال به ۱۲۰ مگاپاسکال تغییر آشکاری در سرعت خزش فرورونده ایجاد نکرده است. همچنین با توجه به جداول ۲ و ۳ تغییر تنش فرورونده از ۹۰ و ۹۷ مگاپاسکال به تنش ۱۱۱ و ۱۲۰ مگاپاسکال منجر به تغییر آشکار سرعت خزش شده است که نقش حفرات (شکل ۴ (ه و و)) و به عبارتی تغییر در توزیع نانوذرات کاربرد سیلیسیم در کامپوزیت تولید شده را آشکار می‌نماید.

### ۳-۳- نتایج آزمون‌های رهاسازی تنش (فرورونده)

در آزمون‌های رهاسازی تنش ضروری است عمق مشخصی از فرورونده در نظر گرفته شده و پس از اعمال نیرو و دستیابی به عمق مورد نظر کرنش ثابت نگاه داشته شده و تغییرات تنش با رهاسازی تنش مورد آزمون قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه آزمون رهاسازی تنش به صورت آزمونی با کرنش ثابت تعریف شده درحالی که آزمون خزش به صورت آزمونی با تغییر فرم پیوسته در نظر گرفته می‌شود می‌توان سرعت خزشی کمتری را به دلیل اعمال کرنش ثابت بیشتر در این روش در نظر گرفت [۱۴]. همچنین با توجه به نمودارهای تغییرات عمق فرورونده (شکل ۵) و با توجه به نقش نانوذرات و تفاوت‌های ساختاری نمونه‌ها مقداری بیش از عمق فرورونده در تنش ۹۰ مگاپاسکال (۰/۱۵ میلیمتر) معادل ۰/۵ میلیمتر به منظور رهاسازی تنش در نظر گرفته شد. در آزمون اول عمق ۰/۵ میلیمتر و سرعت  $s^{-1}$  -۳

جدول (۶): تغییرات تنش با زمان در آزمون های رهاسازی تنش نمونه های ۱ و ۲ و ۳ با اختلاف چگالی ۵ درصد

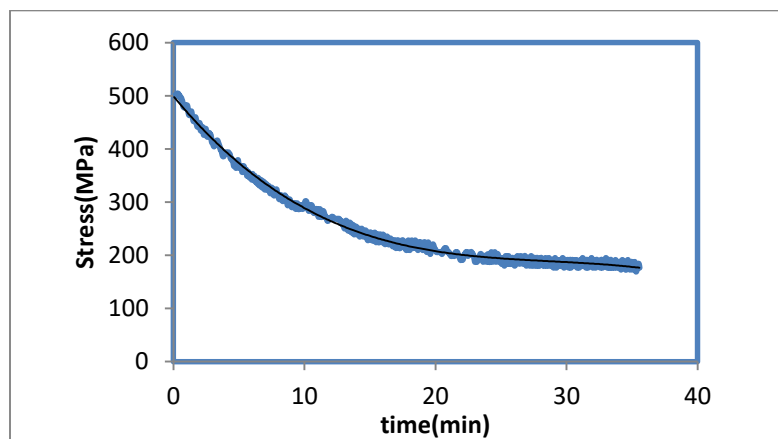
نمونه	عمق فرورونده (میلیمتر)	سرعت فرورونده $\times 10^{-3} /s$	$\times 10^{-3} d\sigma/dt$ (MPa/s)
۱	۰/۵	۱/۷	۷
۲	۰/۵	۱/۷	۰/۹
۳	۰/۵	۱/۷	۳



شکل (۶): نمودار تنش برحسب زمان در عمق فرورونده برابر با ۰/۵ میلیمتر و سرعت  $10^{-3} /s$  سه نمونه با اختلاف چگالی کمتر از ۵ درصد در نظر گرفته شده است

مرجع روش رهاسازی تنش [۷]، این ممانعت از حرکت نابجایی ها به وجود تنش اصطکاکی تعبیر شده است. با افزایش زمان، ایجاد شرایط پایدار (تعادل بین مکانیزم های کارسختی و بازیابی)، با ایجاد ناحیه خطی در نمودار رهاسازی تنش بیان می شود.

در روش رهاسازی تنش با توجه به شکل ۷ در زمان های اولیه سرعت رهاسازی تنش بالا می باشد، (به عبارتی سرعت تغییر فرم به دلیل حرکت نابجایی ها بالا می باشد) و با افزایش زمان، به دلیل تداخل میدان تنشی نابجایی ها و ذرات تقویت کننده نانو که به عنوان موانع حرکت نابجایی ها عمل می کنند و نیز افزایش کارسختی نمونه سرعت حرکت نابجایی ها کاهش می یابد. در



شکل (۷): نمودار آزادسازی تنش در تنش مشخص [۵]

جدول (۷): ارزیابی ضریب ثابت C (رابطه نرخ خزش فشاری و نرخ رهاسازی تنش (تنش خزشی فشاری ۳۲/۵ مگاپاسکال و سرعت (ثانیه/۱)  $10^{-6} \times 3/3$ )

نمونه	عمق فرورونده (میلیمتر)	سرعت فرورونده $\times 10^{-3}$ ۱/s	$d\sigma/dt$ (MPa/s) $\times 10^{-3}$	ضریب C	میانگین ضریب C
۱	۰/۵	۱/۷	۷	۲۱۲۱	۱۱۰۱
۲	۰/۵	۱/۷	۰/۹	۲۷۳	
۳	۰/۵	۱/۷	۳	۹۰۹	

در نمودارهای شکل ۶ به دلیل وجود نانوذرات و ذرات اکسیدی سرعت رهاسازی تنش و یا تغییر فرم پلاستیک و به عبارتی سرعت خزش پایین می باشد. ذرات اکسیدی (اکسید آلومینیوم) به دلیل اکسیداسیون ذرات پودر کامپوزیتی در اثر تخلیه پودر کامپوزیتی از آسیاب در مجاورت هوا تشکیل شده و در ریزساختار تولید شده به وجود آمده اند. این ذرات همراه با نانوذرات کاربید سیلیسیم منجر به افزایش ضریب ویسکوزیته در نمونه شده و نقش حفرات در افزایش سرعت رهاسازی تنش را کاهش می دهند. رفتار اختلاف شیب نواحی خطی به اختلاف توزیع ذرات تقویت کننده و حفرات در لایه های مختلف نمونه مربوط می گردد. دلیل و توجیه این اختلاف به شرایط مشابه حالت پایدار (توزیع یکنواخت نسبی نانوذرات فاز ثانویه و حفرات در زمینه) در کامپوزیت ها مرتبط می گردد. به عبارتی مطابق شکل ۴ (الف-و) در فرایند آلیاژسازی مکانیکی شرایط کاملا پایدار یا توزیع کاملا یکنواختی از نانوذرات کاربید سیلیسیم در زمینه آلومینیوم و توزیع کاملا یکنواختی از اندازه ذرات پودر کامپوزیتی حاصل نشده است. همچنین افت های مشخصی در نمودارهای رهاسازی تنش مشخص شده که بیانگر وجود حفرات به عنوان عامل افزایش تغییر فرم و افزایش سرعت خزشی می باشد [۷]. همچنین می توان افزایش سرعت رهاسازی تنش در نمونه ۱ را به وجود حفرات بزرگتر که منجر به تغییرات حجمی پس از تفجوشی نمونه شده و به صورت ترک هایی بر سطح نمونه ظاهر می شود مرتبط دانست.

در نمودارهای شکل ۶ به دلیل وجود نانوذرات و ذرات اکسیدی سرعت رهاسازی تنش و یا تغییر فرم پلاستیک و به عبارتی سرعت خزش پایین می باشد. ذرات اکسیدی (اکسید آلومینیوم) به دلیل اکسیداسیون ذرات پودر کامپوزیتی در اثر تخلیه پودر کامپوزیتی از آسیاب در مجاورت هوا تشکیل شده و در ریزساختار تولید شده به وجود آمده اند. این ذرات همراه با نانوذرات کاربید سیلیسیم منجر به افزایش ضریب ویسکوزیته در نمونه شده و نقش حفرات در افزایش سرعت رهاسازی تنش را کاهش می دهند. رفتار اختلاف شیب نواحی خطی به اختلاف توزیع ذرات تقویت کننده و حفرات در لایه های مختلف نمونه مربوط می گردد. دلیل و توجیه این اختلاف به شرایط مشابه حالت پایدار (توزیع یکنواخت نسبی نانوذرات فاز ثانویه و حفرات در زمینه) در کامپوزیت ها مرتبط می گردد. به عبارتی مطابق شکل ۴ (الف-و) در فرایند آلیاژسازی مکانیکی شرایط کاملا پایدار یا توزیع کاملا یکنواختی از نانوذرات کاربید سیلیسیم در زمینه آلومینیوم و توزیع کاملا یکنواختی از اندازه ذرات پودر کامپوزیتی حاصل نشده است. همچنین افت های مشخصی در نمودارهای رهاسازی تنش مشخص شده که بیانگر وجود حفرات به عنوان عامل افزایش تغییر فرم و افزایش سرعت خزشی می باشد [۷]. همچنین می توان افزایش سرعت رهاسازی تنش در نمونه ۱ را به وجود حفرات بزرگتر که منجر به تغییرات حجمی پس از تفجوشی نمونه شده و به صورت ترک هایی بر سطح نمونه ظاهر می شود مرتبط دانست.

به منظور محاسبه رابطه موجود بین نرخ خزش فشاری و نرخ رهاسازی تنش، نتایج موجود در جداول ۶ و ۱ با استفاده از ضریب C در جدول ۷ به یکدیگر مربوط شده است. همچنین در

روش رهاسازی تنش مطابق رابطه ۵ تعیین مدول الاستیک ماده در محاسبه ضریب می تواند به کار گرفته شود. با توجه به نتایج تجربی ضریب الاستیک ماده فوق ۲۸۰/۶۴ مگاپاسکال به دست آمده است. با توجه به ضریب محاسبه شده در تنش ۳۲/۵ مگاپاسکال (۱۱۰۱) این ضریب را می توان معادل حاصل ضرب سه فاکتور مدول الاستیک (۲۸۰ مگاپاسکال)، قطر فرورونده (۲ میلیمتر) و ضریب مرتبط کننده سرعت خزش فرورونده و خزش فشاری (۲) در نظر گرفت. در آزمون های رهاسازی تنش (فرورونده) نیز می توان به نقش موثر حفرات در مقایسه با نانوذرات کاربید سیلیسیم با توجه به ضریب بالای ۱۱۰۱ که ۴ برابر مدول الاستیک کامپوزیت به دست آمده است به روشنی اشاره نمود.

#### ۵- نتیجه گیری

با توجه به پژوهش انجام شده نتایج ذیل به دست آمده است:

۱. به منظور ارزیابی رفتار خزشی کامپوزیت Al-۴ vol.%SiC تولید شده روش های مختلف خزش فشاری، خزش فرورونده و روش رهاسازی تنش به کار گرفته شد. به عبارتی مقاومت ماده تولید شده در برابر تغییر فرم پلاستیک در بازه زمانی با روش های مختلف سنجیده شد. در نمونه های متخلخل نانو کامپوزیت

آلیاژسازی مکانیکی"، فصلنامه علمی- پژوهشی فرایندهای نوین در مهندسی مواد، مقاله ۱۰، دوره ۹، شماره ۴، صفحه ۹۳-۱۰۶، ۱۳۹۵.

[4] A El-Daly, M. Abdelhameed, M. Hashish & M. Daoush Walid, "Fabrication of silicon carbide reinforced aluminum matrix nanocomposites and characterization of its mechanical properties using non-destructive technique", *Materials Science & Engineering*, Vol. 559A, pp. 384-393, 2013.

[5] E. Mostaed, H. Saghafian, A. Mostaed, A. Shokuhfar & H. R. Rezaie, "Investigation on preparation of Al-4.5%Cu/SiCp nanocomposite powder via mechanical milling", *Powder Technology*, Vol. 221, pp. 278-283, 2012.

[۶] محمدرضا دشت بیاض و محمد رضا عباسی، "بررسی تغییر اندازه ذرات پودر نانو کامپوزیت Al/SiC تولید شده به روش آلیاژسازی مکانیکی"، فصلنامه علمی- پژوهشی فرایندهای نوین در مهندسی مواد، مقاله ۵، دوره ۹، شماره ۱، صفحه ۳۷-۵۳، ۱۳۹۴.

[7] J. Gittus, "Creep, Viscoelasticity and creep fracture in solids", England: Applied Science Publishers, 1975.

[8] S. Golmakaniyoon & R. Mahmudi, "Microstructure and creep behavior of the rare-earth doped Mg-6Zn-3Cu cast alloy", *Materials Science and Engineering*, Vol. 528A, pp. 1668-1677, 2011

[9] M. Keyvani, R. Mahmudi & G. Nayyeri, "Microstructure and Impression Creep Characteristics of Cast Mg-5Sn-xBi Magnesium Alloys", *Metallurgical and Materials Transactions*, Vol. 42A, pp. 1990-2003, 2011.

[10] B. Nami, H. Razavi, S. M. Miresmaeil, Sh. Mirdamadi & S. G. Shabestari, "Impression creep properties of a semi-solid processed magnesium-aluminum alloy containing calcium and rare earth elements", *Scripta Materialia*, Vol. 65, pp. 221-224, 2011.

[11] R. Mahmudi, A. R. Geranmayeh, H. Noori, H. Khanbareh & N. Jahangiri, "comparison of impression, indentation and impression-relaxation creep of lead-free Sn-9Zn and Sn-8Zn-3Bi solders at room temperature", *Journal of Material Science: Mater Electron*, Vol. 20, pp. 312-318, 2009.

[12] R. Geranmayeh & R. Mahmudi, "Compressive and impression creep behavior of a cast Mg-Al-Zn-Si

وجود ضریب ثابت تبدیل نرخ خزش فرورونده و فشاری (۲) در نسبت تنش خزش فرورونده سه برابر تنش فشاری اثبات گردید.

۲. نتایج بیانگر افزایش نرخ خزش فرورونده با افزایش تنش وارد شده در این روش بوده است درحالی که این افزایش در بازه تنش ۱۲۰-۱۱۱ مگاپاسکال به دلیل تغییرات توزیع حفرات و نانوذرات کاربید سیلیسیم در کامپوزیت ثابت بوده است. نتایج بیانگر نقش موثر حفرات در افزایش نرخ خزش فشاری و خزش فرورونده می باشد.

۳. روش های خزش فرورونده و رهاسازی تنش به عنوان روش های جایگزین روش خزش فشاری می تواند از مزیت زمان کوتاهتر انجام آزمون بهره مند شده و روش رهاسازی تنش ضریب ۲ در تبدیل سرعت خزش فرورونده و فشاری را اثبات نموده است.

۴. نتایج سرعت خزش نمونه های خزشی بیانگر ایجاد شرایط مشابه حالت پایدار در روش آلیاژسازی مکانیکی بوده و نتایج توزیع حفرات در ریزساختار نیز این امر را تایید می کند. همچنین مقادیر بالای ضریب به دست آمده که نرخ خزش فرورونده و خزش فشاری را به یکدیگر مرتبط می کند در آزمون های فرورونده (رهاسازی و خزش فرورونده) تاییدی بر نقش موثرتر حفرات در مقایسه با نانوذرات کاربید سیلیسیم و ذرات اکسیدی در سرعت خزش آزمون های فرورونده می باشد.

## ۶- مراجع

[1] M. Sherif EL-Eskendarany, "Mechanical alloying for fabrication of advanced engineering materials", New York, U.S.A.: William Andrew Publishing, 2000.

[2] R. S. Rana, Rajesh Purohit & S. Das, "Review of recent Studies in Al matrix composites", *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Vol. 3, pp. 1-16, 2012.

[۳] دانیال داوودی، سید امیرحسین امامی و علی سعیدی، "تولید و بررسی خواص مکانیکی پودر نانو کامپوزیت آلومینیوم ۷۰۱۴/آلومینا به روش

- [18] Sh. Ansary, R. Mahmudi & M. J. Esfandyarpour, "Creep of AZ31 Mg alloy: A comparison of impression and tensile behavior", *Materials Science & Engineering*, Vol. 556A, pp. 9–14, 2012.
- [19] B. Nami, H. Razavi, Sh. Mirdamadi, S. G. Shabestari & S. M. Miresmaeili, "Effect of Ca and Rare Earth Elements on Impression Creep Properties of AZ91 Magnesium Alloy", *Metallurgical and Materials Transactions*, Vol. 41A, pp. 1973-1982, 2010.
- [20] J. J. Bhattacharyya & R. Mitra, "Effect of hot rolling temperature and thermal cycling on creep and damage behavior of powder metallurgy processed Al-SiC particulate composite", *Materials Science & Engineering*, Vol. 557A, pp. 92–105, 2010.
- [13] M. Kangoie, R. Mahmudi & A. R. Geranmayeh, "Impression Creep of a Lead-Free Sn-1.7Sb-1.5Ag Solder Reinforced by Submicron-Size Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Particles", *Journal of Electronic Materials*, Vol. 39, pp. 215-222, 2009.
- [14] Y. Jung, S. Yong-Nam, Ch. Byoung-Kwon & P. Jeong-Yong, "Behavior of stress-relaxation and the estimation of creep in Zr-1.1Nb-0.05Cu alloy", *Materials and Design*. Vol. 42, pp. 118–123, 2012.
- [15] Zh. Lin, S. L. Chan & F. A. Mohamed, "Effect of nano-scale particles on the creep behavior of 2014 Al", *Materials Science and Engineering*. Vol. 394, pp. 103–111, 2005.
- [16] XU. Fu-mina, WU. Lawrence Chi-manb, H. Guang-weic & T. Yi, "Compression creep behavior of high volume fraction of SiC particles reinforced Al composite fabricated by pressureless infiltration", *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 20, pp. 115-119, 2007.
- [17] D. H. Sastry, "Impression creep technique, An overview", *Materials Science and Engineering*, Vol. 409A, pp. 67–75, 2005.

#### ۷- پی نوشت

- [1] powder metallurgy