

# مدل سازی فرآیند تغییر شکل ذرات نانوکامپوزیت AI-CNT در حین فرآیند آسیاب کاری پر انرژی

مهدی امیدی<sup>۱</sup>، مهرداد خاکبیز<sup>۲\*</sup>، حسین مناجاتی زاده<sup>۳</sup>

۱- مری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، گروه مواد، نجف آباد، اصفهان، ایران

۲- استادیار، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، گروه مواد، نجف آباد، اصفهان، ایران

\*khakbiz@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۳/۲۸، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۴/۲۳)

## چکیده

در این تحقیق مخلوط پودری آلومینیم حاوی مقادیر مختلف نانولوله‌های کربنی (۲ و ۵ درصد وزنی) با روش آسیاب کاری تهیه شد. توزیع اندازه ذرات در مخلوط‌های پودری با استفاده از دستگاه اندازه گیر اندازه ذرات بررسی شد. به منظور بررسی اندازه کریستال‌ها آزمایش تفرق اشعه X انجام شد. در ادامه یک مدل جدید به منظور تخمین میزان کرنش و تنش وارد بر پودرها ارائه شد و نمودار تنش - کرنش پودرها رسم شده و میزان کارسختی پودرها محاسبه گردید. میزان انرژی کسب شده توسط پودرها نیز با انتگرال گیری از سطح زیر نمودار تنش - کرنش محاسبه شد. سپس میزان انرژی که توسط آسیاب به پودرها وارد می‌شود نیز بدست آمده و با تقسیم انرژی کرنش بر انرژی آسیاب میزان بازدهی آسیاب بدست آمد. به منظور بررسی اندازه کریستال‌ها آزمایش تفرق اشعه X انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش زمان آسیاب کاری و همچنین درصد نانولوله‌های کربنی، اندازه ریزتری از مخلوط پودرها حاصل می‌شود. نمودارهای تنش بدست آمده نشان داد که با افزایش زمان آسیاب کاری تنش وارد شده بر پودرها افزایش می‌یابد همچنین تنش بیشتری به نمونه‌های کامپوزیتی وارد می‌شود. بررسی‌ها نشان داد که با افزایش میزان آسیاب کاری میزان بازدهی آسیاب بیشتر می‌شود با این وجود نرخ بازدهی آسیاب کاهش می‌یابد. مطالعات تفرق اشعه ایکس مخلوط‌های پودری نشان می‌دهد که در فرآیند آسیاب کاری مخلوط پودری، اندازه کریستال‌های کوچک‌تری نسبت به پودرهای خالص ایجاد می‌شود.

## واژه‌های کلیدی:

نانوکامپوزیت زمینه فلزی، نانولوله کربنی، آسیاب کاری، مدل سازی

## ۱- مقدمه

از جمله روش‌هایی که به سرعت جهت تولید محدوده وسیعی از مواد پیشرفته مثل نانو کریستال‌ها، نانوکامپوزیت‌ها و غیره توسعه یافته است، روش آلیاژسازی مکانیکی می‌باشد [۱]. آلیاژسازی/آسیاب کاری مکانیکی روش

## ۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق پودر آلیاژ آلومینیم با اندازه ۷۱ میکرومتر و نانولوله‌های کربنی با قطر ۸۰ نانومتر از شرکت Nanotech. Co تهیه شد. مخلوط پودر آلومینیم به همراه مقادیر مختلف از نانولوله‌های کربنی (۲ و ۵ درصد وزنی) توسط آسیاب گلوله‌ای پر انرژی در مدت زمان‌های مختلف بین ۲ تا ۲۰ ساعت تحت آسیاب کاری قرار گرفتند. نسبت وزنی پودر به گلوله در فرایند آسیاب کاری ۲۰ و از اتانول به عنوان عامل کنترل کننده فرایند استفاده شد. پس از آسیاب کاری در زمان‌های مختلف نمونه‌های پودری از مخلوط پودری انتخاب و مورفولوژی پودرها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (مدل CamScan MV2300) و اندازه ذرات توسط دستگاه آنالیز ذرات توسط لیزر (مدل CILAS 10765) مورد بررسی قرار گرفت. جهت تعیین اندازه کریستال‌های آلومینیم از الگوی تفرق اشعه ایکس (Philips PW-1730) استفاده شد.

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- بررسی مورفولوژی

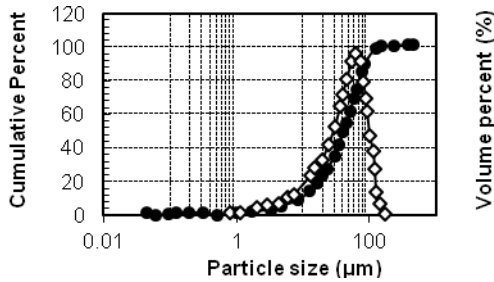
تصویر نانولوله‌های کربنی مورد استفاده در این تحقیق در شکل (۱-الف) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود این نانولوله‌ها به شدت آگلومره شده‌اند. شکل (۱-ب) تصویر SEM از پودر آلومینیم اولیه را نشان می‌دهد در این شکل پودرهای آلومینیم تقریباً کروی شکل می‌باشند.

شکل (۱-ج) نیز تغییرات مورفولوژی مخلوط پودری (5% AI-CNT) را بعد از ۲ ساعت آسیاب کاری نشان می‌دهد. تصاویر نشان می‌دهند که پودرهای کروی آلومینیم در طول فرایند آسیاب کاری به ذرات ورقه‌ای شکل تبدیل شده‌اند. شکل (۱-ج) نشان می‌دهد که پس از ۲ ساعت آسیاب کاری مخلوط پودری (5% AI-CNT)، خوشه‌هایی از نانولوله‌های کربنی در سطح ذرات پودر آلومینیم وجود دارد

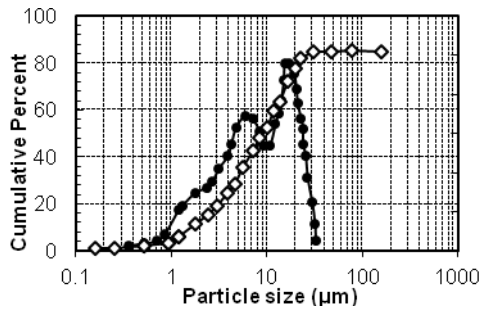
مناسبی برای تولید نانو کامپوزیت‌هایی با توزیع یکنواخت از فاز استحکام بخش نانومتری می‌باشد. در طول فرایند آسیاب کاری در پودر فلزات نرم، تغییر شکل پلاستیکی، شکست و جوش سرد ذرات اتفاق افتاده و پودر نانو کامپوزیتی با توزیع یکنواخت ذرات در مخلوط پودری ایجاد می‌شود. بررسی‌های انجام گرفته توسط خاکباز [۲-۳] و همکارانش جهت تولید نانو کامپوزیت‌های AI-B<sub>4</sub>C با روش آسیاب کاری نشان می‌دهد که پس از ۸ ساعت آسیاب کاری یک توزیع یکنواخت از نانو ذرات B<sub>4</sub>C در ذرات پودر آلومینیم حاصل می‌شود. امروزه مدل سازی یکی از روش‌های مطلوب در جهت بهینه سازی فرایند به منظور رسیدن به بهترین حالت می‌باشد. هم‌اکنون مدل سازی به عنوان یکی از ابزارهای کارآمد در علم مواد مطرح شده است و تحقیقات بسیار فراوانی در این زمینه انجام می‌گیرد [۴-۵]. هدف همه این تحقیقات در سه بخش پیش بینی خواص، بهینه سازی فرایند و یا کاهش زمان انجام آزمایش‌ها می‌باشد. با توجه به قابلیت مناسب فرایند آسیاب کاری در تولید مواد پیشرفته هنوز مدل کردن این فرایند در اول راه خود به سر می‌برد و تحقیقات زیادی در این زمینه انجام نشده است. با این وجود تلاش‌هایی در این زمینه صورت گرفته است که شامل مدل سازی با روش شبکه عصبی و یا مدل سازی ریاضی [۶-۷] می‌باشد. مکانیزم تغییر شکل پودرها در فرایند آسیاب کاری هنوز معلوم نیست و در هیچ کدام از تحقیقات صورت گرفته روشی به منظور تخمین تنش وارد بر پودرها مورد بررسی قرار نگرفته است. هدف این تحقیق ارائه یک روش جدید به منظور مدل سازی فرایند آسیاب کاری در ساخت نانو کامپوزیت AI-CNT می‌باشد. در این تحقیق میزان انرژی که از آسیاب به پودر انتقال می‌یابد مورد محاسبه قرار خواهد گرفت و اثر پارامترهای مواد و فرایند بر روی بازدهی آسیاب مورد بررسی قرار می‌گیرد.

تغییر شکل پلاستیک شدید و شکستن ذرات ایجاد می شود، ذرات آلومینیم ورقه ای شکل ریزتری تولید می شود.

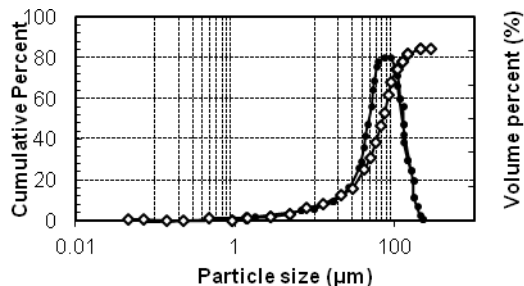
که نشان دهنده عدم توزیع یکنواخت نانولوله ها در این زمان از آسیاب کاری می باشد.



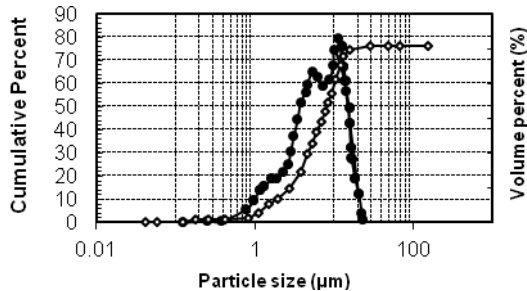
(الف)



(ب)



(ج)

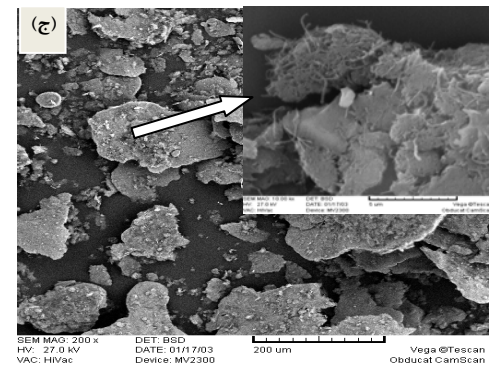
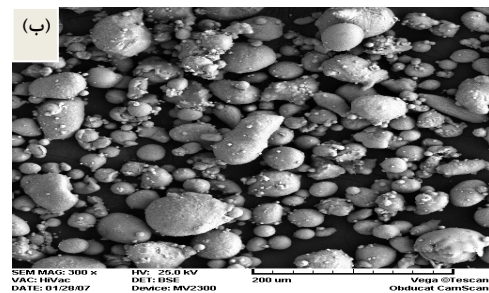
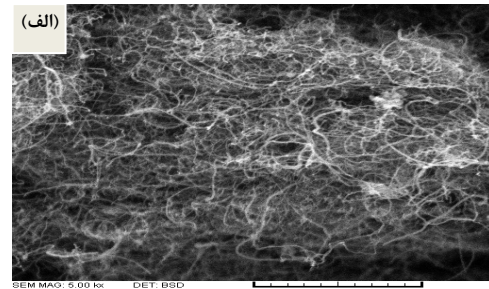


(د)

شکل (۲): تاثیر زمان آسیاب کاری بر توزیع اندازه ذرات آلومینیم AI

خالص و AI(5% CNT، الف): AI-2hr، ب): AI-20hr،

ج): AI(5% CNT)-2hr و د): AI(5% CNT)-20hr.

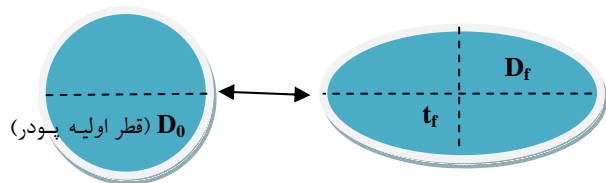


شکل (۱): تصاویر SEM از پودر الف): نانولوله های کربنی، ب): پودر آلومینیم اولیه و ج): مخلوط AI(5%) پس از ۲ ساعت آسیاب کاری

### ۲-۳- بررسی اندازه ذرات

در شکل (۲) تاثیر زمان آسیاب کاری بر توزیع جمعیتی و توزیع نرمال اندازه ذرات در AI خالص و مخلوط های پودری AI(5% CNT) نشان داده شده است. همان گونه که در نمودارها مشاهده می شود با افزایش زمان آسیاب کاری، از ۲ ساعت به ۲۰ ساعت برای هر یک از نمونه ها نمودار توزیع اندازه ذرات به سمت چپ منتقل می شود. این موضوع نشان می دهد که با افزایش زمان آسیاب کاری که نتیجه آن

برخورد گلوله‌ها نشان داده شده است.



(الف)

(ب)

شکل (۴): نحوه تغییر شکل یک پودر نرم در اثر برخورد گلوله‌ها

(الف): قبل از برخورد، (ب): بعد از برخورد گلوله‌ها

حجم یک پودر کروی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V_o = \frac{4}{3} \pi r^3 \quad (1)$$

که  $V_o$  و  $r$  به ترتیب حجم پودر و شعاع پودر می‌باشد.

حجم یک پودر ورقه‌ای به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V_f = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D_f}{2}\right)^2 * t_f \quad (2)$$

که در آن  $V_f$ ،  $D_f$  و  $t_f$  به ترتیب حجم، قطر و ضخامت پودر ورقه‌ای می‌باشد. اگر فرض شود که حجم پودرها در هنگام آسیاب کاری ثابت باشد، ضخامت پودر ورقه‌ای مطابق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$t_f = \frac{\frac{4}{3} \pi r^3}{\frac{4}{3} \pi \left(\frac{D_f}{2}\right)^2} \quad (3)$$

لذا میزان کرنشی که به پودر آلومینیم در هنگام آسیاب کاری وارد می‌شود مطابق رابطه زیر بدست می‌آید:

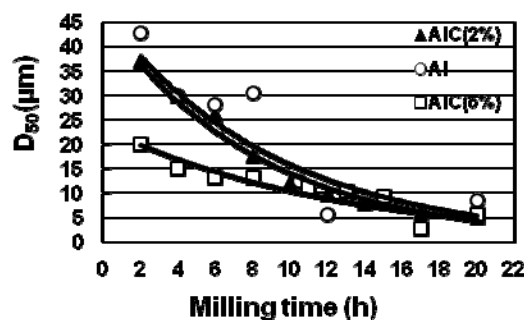
$$\varepsilon = \ln\left(\frac{D_o}{t_f}\right) \quad (4)$$

و رابطه تنش و کرنش را می‌توان به صورت زیر نوشت:

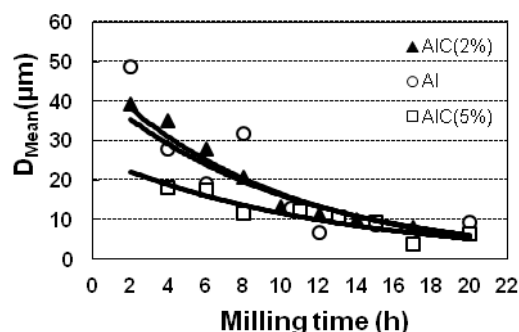
$$\sigma = k \varepsilon^n \quad (5)$$

که در آن  $K$  و  $n$  ثابت بوده و برای آلومینیم به ترتیب  $MPa$  ۱۸۰ و ۰/۲ می‌باشد. با بدست آوردن کرنش

در شکل (۳) تاثیر زمان آسیاب کاری بر پارامترهای  $D_{mean}$  (اندازه متوسط ذرات) و  $D_{50}$  (اندازه ۵۰ درصد ذرات) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش زمان آسیاب کاری اندازه ذرات کاهش می‌یابد، ولی در زمانهای زیاد آسیاب کاری تغییرات چندانی در اندازه ذرات مشاهده نمی‌شود. همچنین با افزودن نانولوله های کربنی، پودرهای ریزتری در فرایند آسیاب کاری ایجاد می‌شود نتایج بدست آمده در این بخش با نتایج محققین دیگر مطابقت دارد [۱].



(الف)



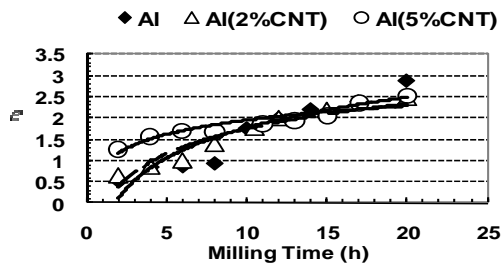
(ب)

شکل (۳): تاثیر زمان آسیاب کاری بر الف:  $D_{50}$ ، ب:  $D_{mean}$

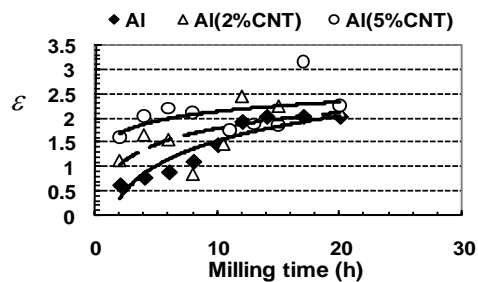
### ۳-۳-۳ مدل سازی فرایند آسیاب کاری

#### ۳-۳-۱- محاسبه انرژی منتقل شده به پودرها

همانطور که عنوان شد مدل سازی یکی از مقوله‌هایی است که بسیار مورد توجه قرار گرفته است، لذا در این بخش تغییر شکل پودرها در حین فرایند آسیاب کاری مدل سازی می‌شود. در شکل (۴) نحوه تغییر شکل پودرها در اثر

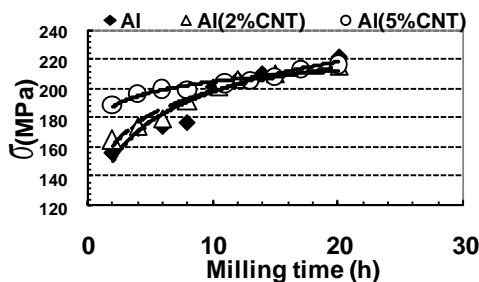


(الف)

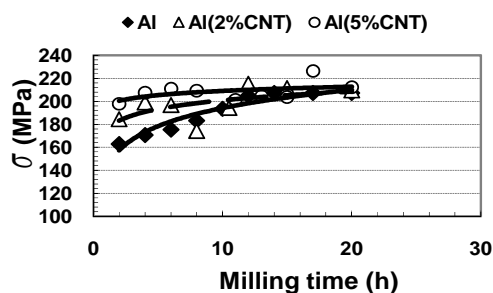


(ب)

شکل (۵): میزان کرنش وارده بر پودرها (الف):  $D_{50}$ ; (ب):  $D_{mean}$



(الف)



(ب)

شکل (۶): میزان تنش بدست آمده برای پودرها (الف):  $D_{50}$ ;

(ب):  $D_{mean}$

(باداشتن قطر اولیه و قطر نهایی پودرها در زمان‌های مختلف) طبق رابطه بالا می‌توان تنش وارده بر پودر را در زمان‌های مختلف محاسبه نمود.

نتایج کرنش بدست آمده برای مخلوط پودرهای مختلف در زمان‌های مختلف برای دو اندازه مختلف  $D_{mean}$  و  $D_{50}$  در شکل (۵) نشان داده شده است. در شکل (۶) نیز تنش وارده بر پودر در زمان‌های مختلف برای دو اندازه مختلف  $D_{mean}$  و  $D_{50}$  نشان داده شده است. موارد زیر در این اشکال مشاهده می‌شود:

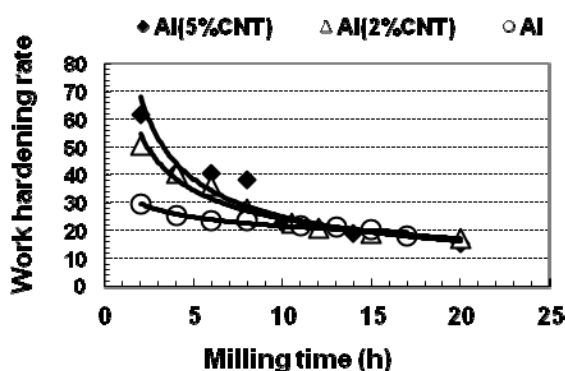
- میزان تنش و کرنش وارده بر پودرها با افزایش زمان افزایش می‌یابد و میزان نرخ افزایش با گذشت زمان کاهش می‌یابد.

- میزان تنش و کرنش وارده بر پودرهای کامپوزیتی بیشتر از پودر خالص آلومینیم می‌باشد. با افزایش درصد نانولوله‌های کربنی میزان این تنش و کرنش بیشتر می‌باشد. با این وجود در زمان‌های زیاد آسیاب کاری میزان تنش و کرنش برای سه نمونه به یک مقدار ثابتی می‌رسد و در واقع فرایند آسیاب کاری در زمان ۲۰ ساعت به حد تعادل رسیده است.

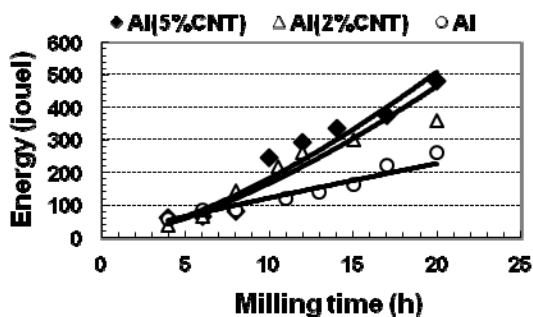
در واقع همان‌طور که نتایج نشان داد با افزایش زمان آسیاب کاری میزان تنش وارد بر پودرها زیادتر شده و سبب کاهش اندازه پودرها می‌شود.

اضافه کردن نانولوله‌ها به پودر سبب می‌شود تا مخلوط کامپوزیتی از پودرها ایجاد شود. در واقع از آنجا که نانولوله‌های کربنی بسیار سخت‌تر از پودر آلومینیم (نانولوله-های کربنی می‌تواند تا تنش ۲۴ GPa بدون هیچ‌گونه تغییر شکلی مقاومت کنند) می‌باشند، این ذرات نیز می‌توانند مانند گلوله‌های آسیاب عمل نمایند، لذا اضافه کردن آن‌ها به پودر آلومینیم سبب می‌شود تا اینکه تنش بیشتری به پودرها وارد شود.

محاسبه نمود که نتایج آن در شکل (۹) نشان داده شده است. در این جا هر چه زمان‌های آسیاب کاری زیادتر می‌شود، تفاوت میزان انرژی که پودرهای کامپوزیتی نسبت به نمونه‌های معمولی دریافت می‌کنند بیشتر می‌شود. به نظر می‌رسد که اضافه نمودن نانولوله‌های کربنی به مخلوط پودری نقش موثری در جذب انرژی اعمالی از آسیاب دارند.



شکل (۸): نمودار میزان کارسختی نمونه‌ها بر حسب زمان



شکل (۹): میزان انرژی جذب شده توسط پودرها در حین فرایند آسیاب کاری

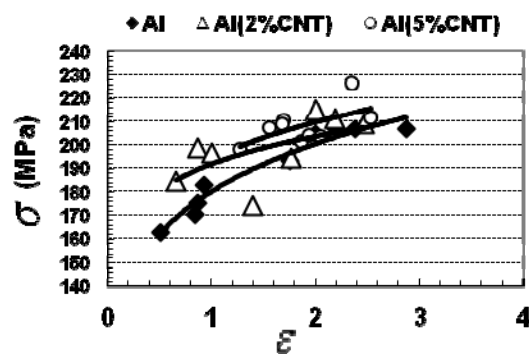
### ۲-۳-۳- محاسبه بازدهی آسیاب

بازدهی آسیاب در فرایند آسیاب کاری هیچ‌گاه صددرصد نیست و تمام انرژی آسیاب صرف شکستن ذرات نمی‌شود. به همین دلیل است که مقداری از آن به گرما تبدیل شده و محفظه آسیاب را گرم می‌کند. در این بخش میزان بازدهی

در شکل (۷) نمودار تنش بر حسب کرنش نشان داده شده است. نکته جالب در این نمودار این است که تنش بدست آمده برای نمونه‌های کامپوزیتی پودری AI-CNT بیش از نمونه‌های خالص می‌باشد. این نتایج با نتایجی که از نمودارهای تنش - کرنش نمونه‌های کامپوزیتی واقعی به دست می‌آید نیز تطابق دارد. شیب نمودار تنش کرنش به عنوان نرخ کارسختی معروف می‌شود، لذا طبق رابطه زیر می‌توان نرخ کارسختی را محاسبه نمود.

$$\text{Work hardening rate} = \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} = kn\varepsilon^{n-1} \quad (6)$$

با بدست آوردن شیب نمودار (شکل ۷) در زمان‌های مختلف می‌توان نرخ کارسختی را بدست آورد که نتایج آن در شکل (۸) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نرخ کارسختی نمونه‌های کامپوزیتی از نمونه‌های معمولی بیشتر می‌باشد، با این وجود در زمان‌های زیاد آسیاب کاری، میزان کارسختی پودرها به حد ثابتی می‌رسد.



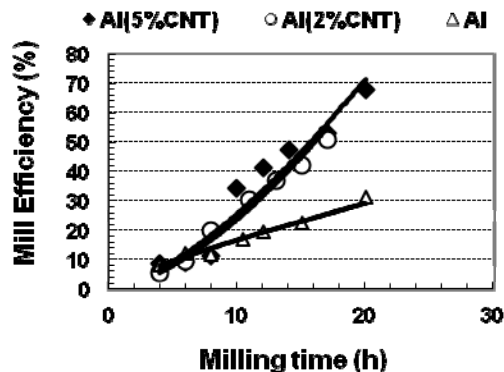
شکل (۷): نمودار تنش - کرنش برای نمونه‌های مختلف

در واقع اضافه کردن نانولوله‌های کربنی در زمان‌های زیاد آسیاب کاری تاثیر چندانی بر روی میزان کارسختی پودرها ندارد. با انتگرال گیری از سطح زیر نمودار تنش - کرنش (شکل ۷) می‌توان انرژی جذب شده توسط پودرها را

b: حاصل ضرب تعداد شاخه های بازو در قطر بازو،  $\mu_m$ : ویسکوزیته مخلوط و C: میزان بار جامد می باشد. در جدول (۱) مقادیر استفاده شده به منظور محاسبه توان موتور نشان داده شده است. با ضرب توان بدست آمده در زمان های مختلف آسیاب کاری می توان انرژی که توسط آسیاب تولید می شود را محاسبه نمود در ادامه با استفاده از رابطه (۷) بازدهی آسیاب محاسبه شده و نتایج در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

جدول (۱): مقادیر ثابت بکار رفته در معادلات

ثوابت	C	H	D	$\Delta$
مقادیر	۰/۵۳۳	۰/۶ m	۰/۱۶ m	۰/۰۹ m
ثوابت	$\rho_b$	$\rho_L$	b	$\mu_m$
مقادیر	۶۰۰۰ kg/m <sup>3</sup>	۲۱ kg/m <sup>3</sup>	۰/۰۲۸m	۰/۰۰۲ Kg/m*s



شکل (۱۰): بازدهی بدست آمده برای آسیاب

با بررسی شکل (۱۰) نتایج زیر به دست می آید:

- بازدهی آسیاب برای پودرهای کامپوزیتی بیشتر از پودرهای معمولی می باشد. در واقع علت این امر تردتر شدن پودرهای کامپوزیتی نسبت به پودرهای نرم آلومینیومی بوده که سبب می شود میزان شکستن آنها بیشتر شود.

آسیاب مورد محاسبه قرار می گیرد. بازدهی آسیاب را می توان طبق رابطه زیر بدست آورد:

$$\eta = \frac{E_m}{E_t} * 100 \quad (7)$$

در این رابطه  $E_m$  همان انرژی کرنشی بوده و  $E_t$  میزان انرژی کلی است که توسط آسیاب تولید می شود. در بخش قبل میزان انرژی کرنشی با انتگرال گرفتن سطح زیر منحنی تنش - کرنش محاسبه شد و توانی که توسط موتور نیز تولید می شود، با استفاده از روابط زیر بدست می آید. [۸-۹]:

$$P_w = M \rho_m \frac{N^3 D^3}{\Delta^2 H} \quad (8)$$

$$\rho_m = \rho_b C + \rho_L (1 - C) \quad (9)$$

$$M = \frac{A}{Re} + B \left( \frac{10^3 + 1.2 Re^{0.66}}{10^3 + 3.2 Re^{0.66}} \right)^h \quad (10)$$

$$Re = \left( \frac{D^2 N \rho_m}{\mu_m} \right) \quad (11)$$

$$A = 14 + \frac{b}{\Delta} \left[ 670 \left( \frac{D}{\Delta} - 0.6 \right)^2 + 18.5 \right] \quad (12)$$

$$B = 10 \left[ 13 - 4 \left( \frac{b}{\Delta} - 0.5 \right)^{0.2} - 1.14 \left( \frac{D}{\Delta} \right) \right] \quad (13)$$

$$h = 1.1 + 4 \frac{b}{\Delta} - 2.5 \left( \frac{D}{\Delta} - 0.5 \right)^2 - 7 \left( \frac{b}{\Delta} \right)^4 \quad (14)$$

$$\mu_m = \mu_L \left[ 1 + 2.5c + 10c^2 + 0.0019 \exp(20c) \right] \quad (15)$$

در این روابط  $P_w$ : توان آسیاب، N: دور موتور (۳۵۰ rpm)، H: ارتفاع محفظه، D: قطر بازوی چرخنده محفظه،  $\Delta$ : قطر محفظه،  $\rho_b$ : دانسیته ذرات،  $\rho_L$ : دانسیته محیط محفظه،

از الگوهای پراش پرتو ایکس و رابطه ویلیامسون- هال [۱۱] و با در نظر گرفتن پیک‌های اول تا چهارم اندازه کریستال‌های ذرات پودری محاسبه شد. به منظور بررسی تاثیر نانولوله‌های کربنی بر اندازه دانه ذرات پودری، اندازه دانه در پودرهای کامپوزیتی AI-CNT نیز محاسبه گردید. نتایج نشان می‌دهند که اندازه کریستال‌ها در ذرات پودر آلومینیم فاقد نانولوله‌های کربنی بعد از ۱۰ ساعت آسیاب کاری از ۱۴۰ نانومتر به ۸۰ نانومتر کاهش می‌یابد. این در حالی است که کاهش اندازه دانه‌ای در پودر کامپوزیتی AI-CNT شدیدتر از پودر آلومینیم فاقد نانولوله کربنی می‌باشد. بعد از ۱۰ ساعت آسیاب کاری مخلوط AIC(5%) اندازه کریستال‌های آلومینیم به ۷۰ نانومتر رسیده است. تسریع فرایند نانو کریستالی شدن در حضور نانولوله‌های کربنی ناشی از فعل و انفعال نانولوله‌های کربنی و نابعایی‌های موجود در پودر کامپوزیتی می‌باشد، لذا اضافه کردن نانولوله‌های کربنی نه تنها اندازه پودرها را کاهش می‌دهد، بلکه اندازه کریستال‌های هر پودر نیز کاهش می‌یابد.

نتایج بدست آمده در این تحقیق با نتایجی که توسط چانگ و همکارانش [۱۲] بدست آمده است مشابه می‌باشد. در واقع اغلب تحقیقات نشان داده‌اند که حضور ذرات سخت در حین آسیاب کاری پودر نرم، باعث تسریع فرایند ریز شدن کریستال‌ها در مخلوط پودری مذکور می‌شود. نکته دیگری که باید به آن توجه نمود در واقع حداقل میزان اندازه کریستال‌ها در حین فرایند آسیاب کاری می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود اگرچه اندازه کریستال‌ها در نمونه‌های کامپوزیتی از نمونه خالص کمتر می‌باشد با این وجود مشاهده می‌شود که بعد از یک زمان مشخص آسیاب کاری، اندازه کریستال‌های آلومینیم و پودرهای کامپوزیتی به حد ثابتی می‌رسد.

محمد و همکاران [۱۳] میزان حداقل اندازه دانه را به صورت زیر ارائه داده‌اند:

• با افزایش زمان آسیاب مشخص می‌شود که شیب نمودارها کاهش می‌یابد و این نشان می‌دهد که میزان تغییرات بازدهی آسیاب، نسب به زمان کاهش می‌یابد. دلیل این امر آن است که با افزایش زمان آسیاب، تعداد پودرها زیادتر شده و انرژی گلوله‌ها نمی‌تواند به خوبی به پودرها انتقال یابد.

• حداکثر بازدهی آسیاب برای پودرهای کامپوزیتی بوده که مقدار آن ۷۰ درصد است. این مسئله نشان می‌دهد که حداقل میزان اتلاف انرژی در آسیاب ۳۰٪ است که سبب گرم شدن آسیاب می‌شود.

تحقیقات مختلف نشان داده‌اند که با افزایش زمان آسیاب کاری دانسیته نابعایی‌ها در ذرات پودری افزایش یافته و به یک حد اشباع می‌رسد. به طور کلی با افزایش دانسیته نابعایی‌ها تنش لازم برای شکستن ذرات زیاد می‌شود، لذا نیاز به انرژی بیشتری برای شکست ذرات می‌باشد و این نیز دلیل دیگری بر کاهش نرخ بازدهی آسیاب بر حسب زمان می‌باشد.

یک پودر کامپوزیتی شامل زمینه‌ای از فلز نرم و ذرات سخت محبوس شده در آن می‌باشد. با توجه به اینکه تافنس شکست کامپوزیت کمتر از زمینه فاقد ذره می‌باشد، لذا می‌توان انتظار داشت که پودر کامپوزیتی AI-CNT سریع‌تر از پودر آلومینیم ریز شده و لذا مقادیر بیشتری از انرژی آسیاب را جذب می‌کند. از طرف دیگر مشاهده شد که گیر افتادن و محبوس شدن ذراتی با ابعاد نانو مانند نانولوله‌های کربنی در زمینه‌ای از یک فاز نرم می‌تواند باعث افزایش شدید کارسختی زمینه نرم شده و لذا تسریع شکست آن شود. مکانیزم محبوس شدن ذرات میکرومتری و نانومتری در یک زمینه نرم در حین فرایند آسیاب کاری توسط محققین مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است [۱۰].

### ۳-۳-۳- نتایج تفرق اشعه X

الگوی تفرق اشعه X پودر آلومینیم پس از زمان‌های مختلف آسیاب کاری در شکل (۱۱) نشان داده شده است. با استفاده



#### ۴- نتیجه گیری

- با افزایش نانولوله‌های کربنی اندازه ریزتری از پودرها به دست می‌آید.
- میزان تنش و کرنش وارد شده بر پودرها محاسبه شده و مشاهده گردید که با افزایش زمان آسیاب، تنش و کرنش زیاد می‌شود.
- اضافه نمودن نانولوله‌های کربنی سبب می‌شود تا تنش بیشتری به نمونه‌های پودری وارد شود.
- انرژی کسب شده در فرایند آسیاب کاری با انتگرال گیری سطح زیر نمودار تنش-کرنش محاسبه شده و مشاهده شد که با افزایش زمان، میزان انرژی کسب شده توسط پودرها بیشتر می‌شود.
- توان اعمالی توسط آسیاب به پودرها محاسبه شده و نتایج نشان داد که بازدهی آسیاب برای خردایش پودرهای کامپوزیتی حاوی ۵ درصد نانولوله‌های کربنی در حدود ۷۰٪ می‌باشد.

#### ۵- تشکر و قدر دانی

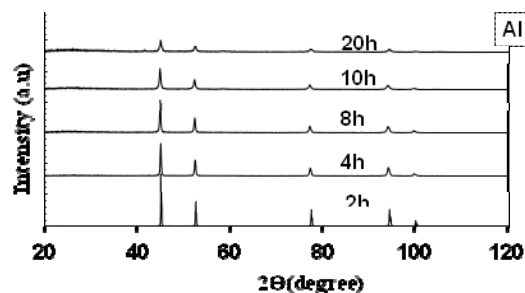
این مقاله مستخرج از طرح پژوهشی با عنوان تدوین دانش فنی تولید نانوکامپوزیت نسل جدید Al-CNT بوده که در دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد تصویب گردید و بدینوسیله از حوزه معاونت پژوهشی واحد نجف آباد جهت در اختیار قرار دادن هزینه های این طرح تشکر و قدر دانی می‌گردد.

#### ۶- مراجع

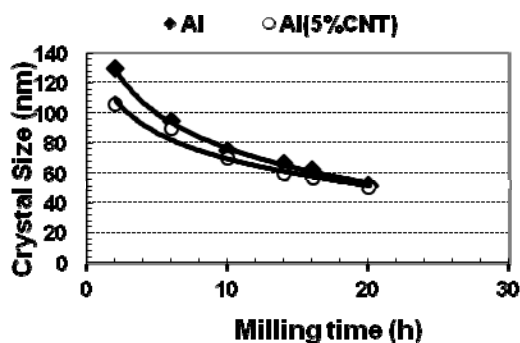
- [1] C. Suryanarayana, "Mechanical Alloying and Milling", Progress in Materials Science, Vol. 46, pp.1-184, 2001.
- [2] M. Khakbiz, F. Akhlaghi, "Effect Of Mechanical Alloying Process Parameters on Characterization of Al-B4C Nanocomposite-Nanocrystalline Powder Particles, International Journal of Modern Physics B, Vol. 22, pp. 2924-2932, 2008.
- [3] M. Khakbiz, F. Akhlaghi, "Synthesis and Structural Characterization of Al-B4C Nanocomposite Powders by Mechanical Alloying", Journal of Alloy and

$$\frac{b}{d_{\min}} = -\frac{2\beta H_0}{3G} + \frac{2}{3}\beta\left(\frac{H}{G}\right) \quad (16)$$

در این رابطه  $b$  بردار برگرز،  $d_{\min}$  حداقل اندازه کریستال‌ها،  $H$  میزان سختی و  $G$  مدول برشی می‌باشد. همان‌طور که مشخص است حداقل اندازه دانه با سختی رابطه معکوس دارد و هرچه میزان سختی پودر بیشتر باشد حداقل اندازه کریستال‌ها نیز کمتر است. این موضوع در طول فرایند آسیاب کاری مشهود است و نتایج بدست آمده در شکل (۱۲) در زمان‌های کم آسیاب کاری با این رابطه سازگاری دارد، ولی در انتهای زمان آسیاب کاری به نظر می‌رسد که پودرها چندان از این رابطه پیروی نمی‌کنند، زیرا میزان اندازه کریستال‌های پودرهای خالص و کامپوزیتی در انتهای زمان آسیاب کاری با یکدیگر برابر می‌شود در حالی که سختی آن‌ها تفاوت دارد.



شکل (۱۱): تفرق اشعه X نمونه‌های پودری در زمان‌های مختلف



شکل (۱۲): اندازه کریستال‌ها بر حسب زمان آسیاب کاری

- [9] D. Eskin, O. Zhupanska, R. Hamey, B. Moudgil, Microhydrodynamic Analysis of Nanogrinding in Stirred Media Milling, *Aiche Journal*, Vol. 51, pp. 1346-1358, 2005.
- [10] Fogagnolo, F. Velasco, M.H. Robert J.M. Torralba, "Effect of Mechanical Alloying on the Morphology, Microstructure and Properties of Aluminum Matrix Composite Powders, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 342, pp. 131-137, 2003.
- [11] K. Williamson, W.H. Hall, "X-ray Line broadening from Filed Aluminum and Wolfram", *Acta Metall.* Vol. 1, pp. 22-27, 1953.
- [12] K.H. Chung J. He, D. H. Shin, J. M. Schoenung, "Mechanisms of. Microstructure Evolution During Cryomilling in the Presence of Hard Particles", *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 356, pp. 23-29, 2003.
- [13] F. A. Mohamed , Y. Xun, "Correlations Between the Minimum Grain Size Produced by Milling and Material Parameters", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 354, pp.133-139,2003.
- Compound, Vol. 27, pp.683-687, 2009.
- [4] N. Altinkok, R. Koker, "Modeling of the Prediction of Tensile and Density Properties in Particle Reinforced Metal Matrix Composites by Using Neural Networks", *Materials and Design*, Vol. 27, pp. 625-31, 2006.
- [5] Y. Liu, N. Nishimura, Y. Otani, "Large-scale Modeling of Carbon-Nanotube Composites by a Fast Multipole Boundary Element Method", *Computational Materials Science*, Vol. 34, pp. 173-187, 2005.
- [6] M.R Dashtbayazi, A. Shokuhfar, A. Simchi, "Artificial Neural Network Modeling of Mechanical Alloying Process for Synthesizing of Metal Matrix Nanocomposite Powders", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 466, pp. 274-83, 2007.
- [7] J. Alkebro, S. Begin-Colin, A. Mocellin, and R. Warren, " Modeling High-Energy Ball Milling in the Alumina Yttria System, *Journal of Solid State Chemistry*", Vol. 164, pp. 88-97, 2002.
- [8] R. G. Hamy, "Particle Deformation During Stirred Media Milling", Ph.D thesis of University Of Florida, Florida, 2008.