

## آلیاژ سازی مکانیکی پودر TiNi برای ساخت قطعات حافظه دار شکلی و سوپر الاستیک

سید خطیب الاسلام صدرتزاد (استاد)

### چکیده

هدف این پژوهه تولید پودر فلزی TiNi با خواص کریستالی و مکانیکی بهینه با حداقل آلدگی، حد اکثر خلوص، مقدار تخلخل مطلوب و میزان ترکیبات بین فلزی قابل قبول برای ساخت قطعات حافظه دار و سوپر الاستیک است. روش آلیاژ سازی مکانیکی به سبب سادگی عملیات، عدم نیاز به دمای بالا، ایجاد فاز آمورف و امکان تولید ذرات نانوکریستال، به عنوان شیوه‌ای جدید برای دستیابی به مواد نو و ابتکاری مورد توجه و استفاده عملی آزمایشگاهی قرار گرفته است. سیستمهای مختلف کویش مانند آسیاب "گله ای"، آسیاب "سیاره ای"، آسیاب "تریتور، آسیاب "اسپکس" و آلیاژ سازی "انفجاری" از دید عملی و امکان یابی اجرا مورد توجه واقع شده و چند نمونه آلیاژی از طریق آسیاب کردن مخلوطهای پودری فلزات تحت شرایط متفاوت تولید شده و مورد بررسی ساختاری و تعیین خواص قرار گرفته است. محصول فرایند دارای قابلیت کاربرد در ساخت قطعات حافظه دار و سوپر الاستیک برای کاربرد در صنعت و پژوهشی می‌باشد. تلفیق روش‌های متالورژی پودر با آلیاژ سازی مکانیکی پیشرفتهای با ارزشی را در زمینه فن آوری تولید قطعات از نظر فنی و اقتصادی نوید می‌دهد.

**کلمات کلیدی:** آلیاژ سازی مکانیکی، حافظه دار، سوپر الاستیک، نایتینول

### مقدمه

آلیاژ سازی مکانیکی پودرهای فلزی در سالهای اخیر مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است [۱-۶]. استفاده از این شیوه به عنوان یکی از جدیدترین روش‌ها برای تولید پودرهای آلیاژی خاص، بویزه انواع هوشمند، حافظه دار، سوپر الاستیک، مغناطیسی و آمورف در سطح تحقیقاتی اکنون در جهان مطرح است [۷-۱۰]. استفاده از روش‌های مختلف آسیابکاری از جمله بکارگیری آسیابهای "سیاره ای"، "تریتور"، "گله ای" و "اسپکس" [۱۱-۱۴] برای ساخت پودرهای آمورف، نیمه کریستالی و کریستالی توسط تعدادی از محققین آزمایش شده است. به علت تفاوت‌های فراوان کلیات و جزئیات سیستمهای روش‌ها، نتایج بدست آمده معمولاً از نوع بسیاری برخوردار بوده و قابلیت تعبیر و تفسیرهای مفصل علمی و بررسیهای ساختاری را دارا می‌باشند. یک روش جدید و ابتکاری برای تولید محلولهای بین فلزی خاص، شیوه آلیاژ سازی انفجاری است که با توجه به تحقیقات اخیر، توانایی قابل ملاحظه‌ای از آن انتظار می‌رود [۱۵].

با وجود توسعه تحقیق در سالهای اخیر، آلیاژ سازی مکانیکی هنوز قابلیت استفاده در مقیاس صنعتی را ندارد؛ زیرا مشکلات



تکنولوژیکی و مسائل توری آن هنوز کاملا حل نشده و تمایل شدید فلز به جذب گاز، جذب کردن و تشکیل رسویات سخت و ترد، اتلاف عناصر فعال مانند تیتانیوم، نرسیدن به ترکیب دقیق، کمبود کار پذیری و هزینه بالا سبب شده که استفاده از روشهای جایگزین همواره مورد توجه و بررسی محققین قرار گیرد.

کاربرد پودر آلیاژ شده به شیوه مکانیکی، نه تنها برای ساختن قطعات دارای خواص ویژه با توجه به امکان دستیابی به ساختار آمورف، مرکب و یا مخلوط آمورف و مرکب با فازهای بسیار ظریف [۱] و نیمه پایدار [۲] و با خصوصیات مطلوب همچون حافظه داری، سوبرالاستیستیه، خواص مغناطیسی و ویژگیهای اپتیکی بسیار مطلوب بنظر می‌رسد [۱، ۲]، بلکه امکان ساده سازی عملیات و فرآگیر شدن فرایند تولید را پیش روی قرار داده و برای آینده‌ای نه چندان دور نوید بخش می‌نماید. این کار معمولاً با استفاده از پودرهای عناصر در حالت کریستالی خود بعنوان ماده اولیه سازنده و با بکارگیری روش آلیاژسازی مکانیکی بعنوان شیوه تولید انجام می‌شود. در اثر تغییر فرم و جوش سرد بی در پی طی مراحل اولیه عملیات، ساختاری لایه ای پدید می‌آید که متعاقباً به کامپوزیتی بسیار ظریف تبدیل می‌شود. در نهایت با انجام فرایند نفوذ در حالت جامد، آلیاژ آمورف تولید می‌شود که اگر از ترکیب مناسب اولیه برخوردار باشد، امکان تبدیل به قطعات حافظه دار شکلی و سوبرالاستیک را دارا خواهد بود.

وجود ناخالصیهای غیر فلزی همچون اکسیژن در محیط عملیات، نه تنها سبب آلوده شدن فلز و یا تشکیل ترکیبات ناخواسته در محصول می‌گردد، بلکه جوانه زنی کریستالهای مرکب را نیز تسهیل کرده و بر فرایند آمورف شدن تاثیر سوء می‌گذارد. بنابراین لازم است ضمن بررسی تاثیر عناصر محیطی بر خصوصیات محصول، بکارگیری سربوشن خلا یا اتمسفر خنثی حین عملیات آلیاژسازی نیز مد نظر قرار گیرد.

مکانیزم فرایند آمورف شدن در آلیاژ جامد TiNi را می‌توان مشتمل بر مراحل زیر دانست:

- ۱- نفوذ تیتانیوم در نیکل آلفا از طریق نقاچی شبکه و سپس جوانه زنی چند وجهی ترکیب  $Ti_{28}Ni_{72}$
- ۲- جوانه زنی و رشد یک لایه آمورف در محل برخورد Ti با Ni و متعاقب آن نفوذ نیکل و یا تیتانیوم در عرض لایه
- ۳- نفوذ سریع نیکل در تیتانیوم آلفای موجود در آلیاژ آمورفی که تشکیل جوانه داده است.

تحقیقات قبلی نشانده‌نه نتش باز دارندگی اکسیژن به سبب مشارکت در اشغال محلهای شبکه و کندی حرکت در شبکه است که سبب قفل شدن محلهای شبکه و کاهش فرایند نفوذ می‌شود. فرایند آلیاژ سازی تحت اکسیژن، سبب چسیدن اتمهای اکسیژن به فضول مشترک فازهای آمورف تولید شده مانند  $\alpha$ -Ni<sub>3</sub>Ti-X/Ti،  $\alpha$ -Ni<sub>3</sub>Ti-X/Ni و  $\alpha$ -Ni<sub>3</sub>Ti-X در هنگام عملیات جوش سرد و شکست پی در پی می‌شود. سرعت نفوذ در هم اتمهای نیکل و تیتانیوم و نفوذ آنها در فاز آمورف  $\alpha$ -Ni<sub>3</sub>Ti-X نیز می‌تواند تحت تاثیر اتمهای کم تحرک اکسیژن بشدت کند شود.

در آلیاژ سازی تحت اتمسفر آرگون، مرحله اول مکانیزم به راحتی انجام می‌شود. وجود اتمهای اکسیژن ولو به مقدار اندک سبب توقف نفوذ نیکل و ایجاد ترکیبات بین فلزی پرنیکلی همچون  $Ni_3Ti$  که بر خواص مکانیکی آلیاژ تاثیرات سوئی دارد، می‌شود. نمونه‌های آسیاب شده برای مدت‌های کوتاه کمتر از حدود ۸ ساعت حساسیت بیشتری نسبت به اکسیژن داشته و فازهای اکسیدی مانند  $Ni_2Ti_4O$  در الگوی اشعه ایکس آنها دیده می‌شود؛ در حالی که نمونه‌های ۲۰ ساعت آسیاب شده حاوی فازهای اکسیدی نیستند.

پودر تولید شده به روش آلیاژ سازی مکانیکی را می‌توان به عنوان ماده اولیه برای روش متالورژی پودر مورد استفاده قرار داد. زیرا عملیات مکانیکی حتی اگر منجر به تشکیل ترکیب بین فلزی  $NiTi$  هم نشود، خواص قطعه نهایی ساخته شده از پودر را تا حد قابل توجهی بهبود می‌بخشد [۳]. بعلاوه قابلیت تولید قطعات پیچیده با کیفیت سطحی برتر، ابعاد نهایی مطلوبتر و خواص حافظه



داری مقبولتر [۴] را تسهیل خواهد کرد. اگر چه کلیات فرایند های آلیاژسازی مکانیکی در مقالات متعدد علمی بحث شده [۲، ۸، ۱۶، ۲۳-۲۷]؛ اما اطلاق این اصول به آلیاژهای خاص [۱، ۳ و ۴] بویژه آلیاژهای حافظه دار و سوپر الاستیک هنوز در هاله ای از ابهام قرار داشته و موضوع تحقیق روز دنیا است.

## روش تحقیق

مواد اولیه مورد نیاز مانند پودر های فلزی، مواد پلی آمیدی و گازهای خنثی برای انجام آزمایش و ساخت بدنه راکتور از منابع داخلی تهیه گردیدند. پودر نیکل با برآده برداری از شمش نیکل و پودر تیتانیوم با آسیاب کردن تیتانیوم اسفنجی با درصد خلوص ۹۹/۵ درصد در دمای صفر درجه سانتیگراد تهیه شده و با الک ۹۰ میکرون، الک شدند. پودرها سپس به نسبت اتمی ۵۰ درصد با یکدیگر مخلوط شدند. مقدار ۱۰ گرم از این مخلوط همراه با ۵ عدد گلوله فولاد کروم دار با نسبت وزن گلوله به پودر ۱:۷ درون یک محفظه پلی آمیدی آب بندی شده ریخته شد. انتخاب جنس پلی آمید به دلیل قابلیت زدودن آن از طریق تبخیر در دمای ۳۸۰ درجه سانتیگراد بود. ظرف پلی آمیدی درون آسیاب سیاره ای شکل ۱-الف قرار داده شد و دور موتور برابر ۲۸۸ دور در دقیقه تنظیم گردید.

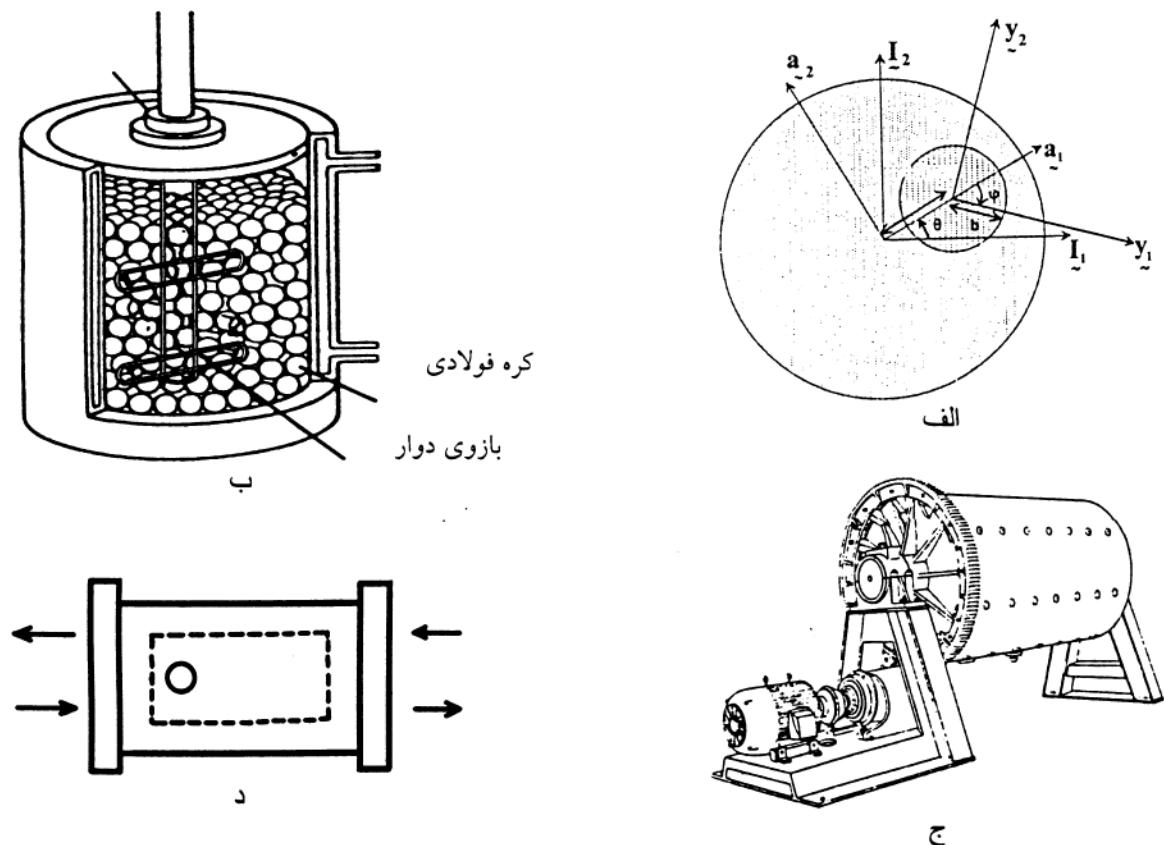
پودر تیتانیوم با اندازه ذرات حدود ۳۰ میکرون و خلوص ۹۹/۹ درصد و پودر نیکل با اندازه دانه تقریبی حدود ۷-۳ میکرون و خلوص ۹۹/۹ درصد هر دو ساخت شرکت مرک آلمان با یکدیگر مخلوط شده و به همراه سه گلوله فولاد کروم دار به قطر ۱۵ میلیمتر با نسبت وزن گلوله به پودر ۱:۱۰ در محفظه پلی آمیدی ریخته شده و توسط آسیاب سیاره ای آسیاب کاری شدند. برای جلوگیری از اکسید شدن عناصر موجود در محفظه آسیاب، از الکل استفاده شد. برای آلیاژ سازی مکانیکی، از آسیابهای مختلف همچون "سیاره ای"، "اتریتور"، "گلوله ای" و "اسپکس" می توان استفاده کرد شکل ۱. آسیاب سیاره ای [۴] از دو قسمت چرخ خورشیدی و محفظه نگهداری مواد تشکیل می شود شکل ۱-الف. وقتی چرخ خورشیدی شروع به گردش می کند، محفظه های مواد نیز همزمان در خلاف جهت چرخش چرخ خورشیدی شروع به گردش می کنند. شکل ۱-الف نمای کلی این آسیاب را نشان می دهد.

در آسیاب اتریتور Attritor یک میله عمودی - که تعدادی بازوی افقی دارد - می چرخد و مخلوط گلوله و پودر را برابر هم می کوید شکل ۱-ب. در اینجا آسیاب کاری با هر دو مکانیزم برش و ضربه انجام می شود. سرعت چرخش میله در شرایط کارگاهی ۶۰ دور در دقیقه و در شرایط آزمایشگاهی ۳۰۰ دور در دقیقه است. قطر گلوله ها ۲ تا ۱۵ میلیمتر بوده و بین ۶۰ تا ۹۵ درصد فضای خالی آسیاب توسط آنها اشغال می شود. شکل ۱-ب طرحواره این آسیاب را نشان می دهد. داخل این آسیاب از سه قسمت مرکزی، اطراف و ناحیه مرده بین پره ها و ته ظرف [۵] تشکیل می شود. ابتدا گلوله ها و پودر در ته ظرف جمع می شوند. سپس به سمت ناحیه مرکزی رفته و از آنجا توسط پره ها به طرف بالا حرکت می کنند. در اثر این حرکت یک فضای خالی ایجاد می شود که این فضا با گلوله دیگری پر می شود؛ گلوله ای که به سمت بالا حرکت می کند در نهایت در اثر وجود گرادیان سرعت شعاعی از ناحیه مرکز خارج شده و وارد نواحی اطراف می شود و این حرکت بصورت ممتد ادامه می یابد [۵].

در شکل ۱، دو نوع آسیاب دیگر - گلوله ای و اسپکس SPEX - قابل استفاده برای آلیاژ سازی مکانیکی نیز برای مقایسه نشان داده شده اند. در آسیاب گلوله ای شکل ۱-ج، مخلوط پودر همراه با تعدادی گلوله کروی یا میله استوانه ای فولادی درون یک استوانه بزرگ ریخته شده و در اثر چرخش محفظه، مواد و گلوله ها بر هم فروند می آیند. از این آسیاب زمانی استفاده می شود که اندازه ذرات اولیه بیش از ۲۰۰۰ میکرون باشد. در این حالت ذرات ریزتر به همان ابعاد باقی خواهند ماند و تغییری در آنها ایجاد نخواهد شد. آسیاب اسپکس را می توان در گروه آسیابهای ارتعاشی با فرکانس ارتعاش کمتر و دامنه ارتعاش بیشتر دارای حرکت



فقط در جهت افقی طبقه بندی کرد. آسیاب ارتعاشی همزمان در سه بعد حرکت پیچیده ای داشته [۲۴] و مواد درون آن در بهترین حالت بین ۸۰ تا ۶۰ درصد حجم آسیاب را اشغال می کند [۲۴] در این آسیاب تنها ۰/۵٪ برخوردهای مابین گلوله و پودر است و فقط ۱/۱٪ برخوردهای انرژی لازم برای آلیاژ سازی را به پودر می دهد. اما به دلیل سرعت بیشتر گلوله و تعداد بیشتر برخورد، بازدهی بیشتری نسبت به سایر آسیابها دارد [۱۱]. شکل ۱-۱ د طرحواره این دستگاه را نشان می دهد.



شکل ۱ - طرحواره چهار نوع آسیاب: (الف) سیاره ای، (ب) اتریتور Attritor، (ج) گلوله ای و (د) اسپکس SPEX

با نصب یک پره اضافی در ناحیه مرده ته ظرف و افزودن طول پره ها تغییراتی در جهت افزایش بازدهی عملیات در طرح دستگاه آسیاب اتریتور داده شد. جنس بدنه محفظه از پلی اتیلن و جنس شافت و پره های آن از فولاد رنگ نزن انتخاب شد و برای ورود و خروج گاز خنثی از دو شیر پنومانیک در بالای محفظه استفاده شد. برای کنترل اتمسفر، کل محفظه کاملاً آب بندی شد. تعداد ۵۰۰ عدد گلوله با ابعاد بینه - قطرهای  $7/8$  و  $4/5$  میلی متر [۶] و با نسبت وزنی مساوی همراه پودر درون محفظه ریخته و آسیاب شدند. شرایط آزمایش و مشخصات نمونه های ساخته شده در آسیاب سیاره ای در جدول ۱ و در آسیاب اتریتور در جدول ۲ فهرست شده اند.



جدول ۱ - نمونه های پودر آسیاب شده توسط آسیاب سیاره ای.

کد	زمان آسیاب کاری ساعت	نسبت وزن گلوله به پودر	دور موتور rpm	اتمسفر آسیاب
X1	۱	۷:۱	۲۸۸	الکل
X2	۲۴	۷:۱	۲۸۸	الکل
Y1	۲	۱۰:۱	۲۸۸	الکل
Y2	۴	۱۰:۱	۲۸۸	الکل
Y3	۶	۱۰:۱	۲۸۸	الکل
Y4	۸	۱۰:۱	۲۸۸	الکل
Y5	۱۰	۱۰:۱	۲۸۸	الکل

جدول ۲ - نمونه های پودر آسیاب شده توسط آسیاب اتریتور.

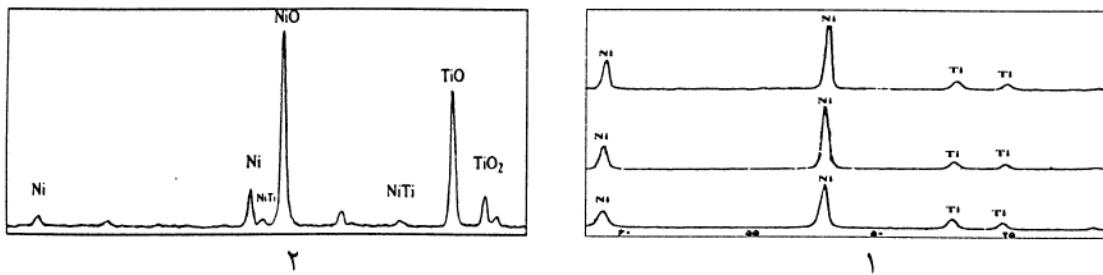
کد نمونه	زمان آسیاب کاری ساعت	دور موتور rpm	اتمسفر آسیاب کاری
Z1	۲	۳۵۰	آرگون
Z2	۴	۳۵۰	آرگون
Z3	۸	۳۵۰	آرگون
Z4	۱۰	۳۵۰	آرگون
Z5	۱۲	۳۵۰	آرگون
Z6	۱۴	۳۵۰	آرگون
Z7	۱۶	۳۵۰	آرگون
Z8	۱۸	۳۵۰	آرگون
Z9	۲۰	۳۵۰	آرگون

از محصولات آسیاب کاری، در فواصل زمانی معین او ۲۴ ساعت گروه اول؛ ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ ساعت گروه دوم و ۲ و ۲۰ ساعت گروه سوم آزمایشها آنالیز XRD به عمل آمد. دستگاه دارای لامپ کالت با طول موج ۱/۷۹۰۳ انگستروم بود و نمونه ها بین زوایای ۴۰ الی ۸۰ درجه بررسی شدند. از پودرهای تهیه شده در گروه دوم آزمایشها بعد از ۱۰ ساعت و گروه سوم بعد از ۱۰ و ۲۰ ساعت توسط میکروسکپ الکترونی رویشی آنالیز بعمل آمد و برای بررسی میزان نفوذ عناصر از دانه های پودر آنالیز نقطه ای گرفته شد. همچنین بعد از ۲۰ ساعت آسیاب کاری از دانه های پودر آنالیز خطی Line-Map Dot-Map تهیه شد. دستگاه ساده ای برای اندازه گیری میزان حافظه داری آلیاز پس از ساخت قطعه نیمه نهایی و یا نهایی با استفاده از پودرهای تولید شده به روش آلیاز سازی مکانیکی طراحی و ساخته شد. نحوه کار دستگاه به این ترتیب بود که با تغییر تدریجی دمای نمونه ساخته شده، تغییر زاویه خم شدگی نمونه با فیلم برداری پیوسته از شکل نمونه تعیین و ثبت می شود. بدین ترتیب دماهای تغییر حالت و شکل دیاگرام کرنش بر حسب دما مشخص و مورد ارزیابی قرار می گیرند. اندازه گیری خصوصیات حافظه داری نمونه های پودری شکل نیز از طریق بررسیهای میکروسکوبی تحت دماهای مختلف به روش مشاهده مستقیم و نیز فیلم برداری در هنگام تغییر شکل یا برگشت کرنش قابل انجام است که در ادامه تحقیق به مورد اجرا گذاشته خواهد شد.



## نتایج و بحث

شکل ۲ - ۱ تاثیر زمان آسیاب کاری را بر فرآیند آلیاز سازی مکانیکی توسط آسیاب سیاره‌ای نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود کاهش شدت پیکهای نیکل بعد از به ترتیب یک و ۲۴ ساعت آسیاب کاری محسوس است؛ اما شدید نیست. دلیل این امر زیاد بودن برهم کنش میان گلوله‌ها به دلیل نسبت بالای وزن گلوله به پودر است که سبب کاهش برخورد مؤثر میان گلوله و پودر می‌شود [۷]. نتیجه آنالیز XRD پودر آسیاب شده به مدت ۲۴ ساعت پس از یک ساعت آنیل در دمای ۹۲۰ درجه سانتیگراد در شکل ۲ نشان داده شده است. وجود فازهای نظیر  $\text{NiO}$ ,  $\text{TiO}$ ,  $\text{TiO}_2$  به همراه فاز  $\text{NiTi}$  نشانگر حساسیت اجزای پودر به خلوص اتمسفر محفظه واکنش است. وجود فاز  $\text{NiTi}$ ، ولو به مقدار اندک، نشانگر تحقق فرایند آلیازسازی مکانیکی است.



شکل ۲ - ۱ نتایج آزمایش XRD: الف بلافاصله بعد از مخلوط شدن، ب ۱ و ۲ X2  
و ۲ . بعد از آنیل کردن در دمای C ۹۲۰ به مدت یک ساعت.

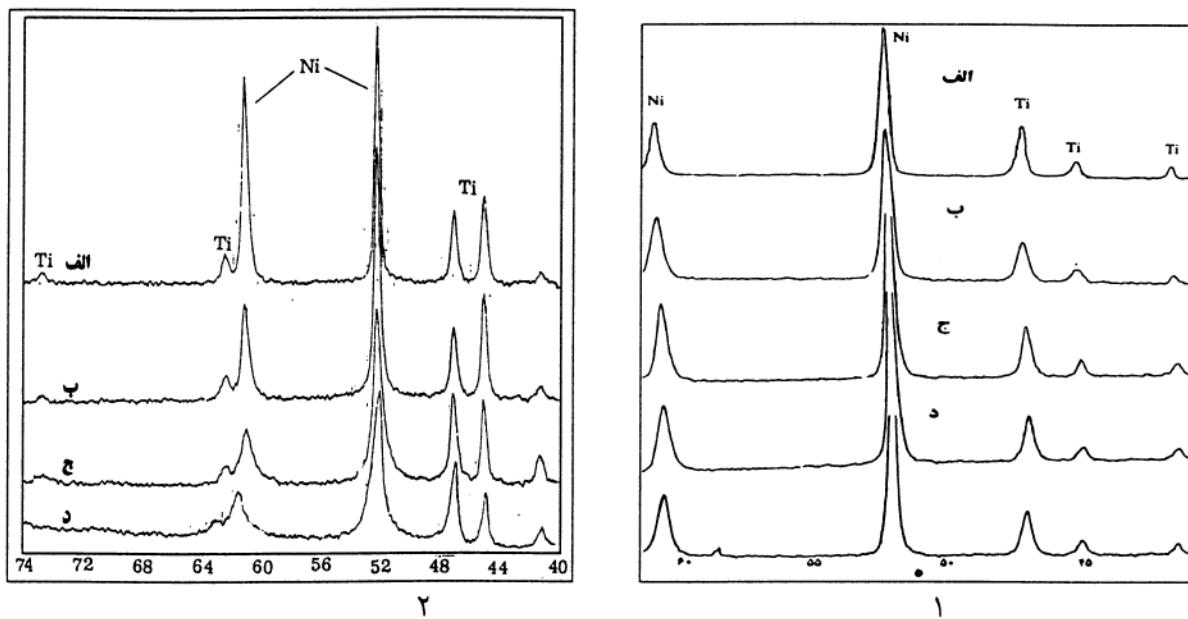
در سری دوم آزمایشها با آسیاب سیاره‌ای، نسبت وزن گلوله به پودر ۱:۱۰ و تعداد گلوله‌ها ۳ انتخاب شد و در دوره‌های زمانی ۲ ساعت، نمونه‌های پودر از محفظه آسیاب خارج شده و بعد از خشک شدن، آنالیز شدند. نتیجه در شکل ۳ - ۱ آورده شده است. ملاحظه می‌شود که تا زمان ۶ ساعت شدت پیک نیکل افزایش و پهنهای آن کاهش می‌یابد. سپس تا ساعت ۱۰، شدت پیک نیکل کاهش و پهنهای آن افزایش می‌یابد. علت این پدیده را در دو عامل زیر می‌توان جستجو کرد:

۱ - خورد شدن ذرات تا رسیدن به اندازه بهینه برای آنالیز XRD [۸]

۲ - آمورف شدن ساختار در اثر کار سرد و نفوذ در هم نیکل و تیتانیوم.

آزمایش‌های بعدی با آسیاب اتریستور انجام شد. پودرهای آسیاب شده در فواصل زمانی ۲، ۴، ۶، ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶، ۱۸ و ۲۰ ساعت انتخاب و آنالیز شدند. نتیجه آنالیز شکل ۳ - ۲ نشان می‌دهد که آسیاب کردن سبب افت طول پیکها و افزایش پهنهای آنها می‌شود. ضمناً این آسیاب نسبت به آسیاب سیاره‌ای بازدهی بیشتری دارد.

مقایسه شکل‌های ۳ - ۲ و ۴ - ۱ نشان می‌دهد که شدت پیکها بعد از ۱۲ ساعت بیشتر از شدت آنها بعد از ۱۰ ساعت آسیابکاری است. دلیل این امر تفاوت نسبت وزن گلوله به پودر در این دو آزمایش است. علت جابجا شدن پیکهای اصلی تیتانیوم پیک سوم از سمت راست پس از ۸ ساعت در شکل ۳ - ۲ و ۱۶ ساعت در شکل ۴ - ۱ به طور کامل مشخص نیست؛ اما محتملابه سبب ایجاد جهات ترجیهی در اثر انجام کار سرد و شکسته شدن دانه‌های تیتانیوم است که با ذخیره بیشتر ناجانیها سرانجام از بین خواهد رفت.



شکل - ۳- ۱ نمودار XRD مخلوط پودرهای خارجی آسیاب شده توسط آسیاب سیاره ای:

الف Y1، ب Y2، ج Y3، د Y4 و ۲ توسط آسیاب اتریتور: الف Z1

ب Z2 و ج Z3 و د Z4 با مقدار ۸ گرم پودر.

با توجه به نتایج فوق، مکانیزم آلیاز سازی مکانیکی را می توان مشتمل بر مراحل زیر دانست:

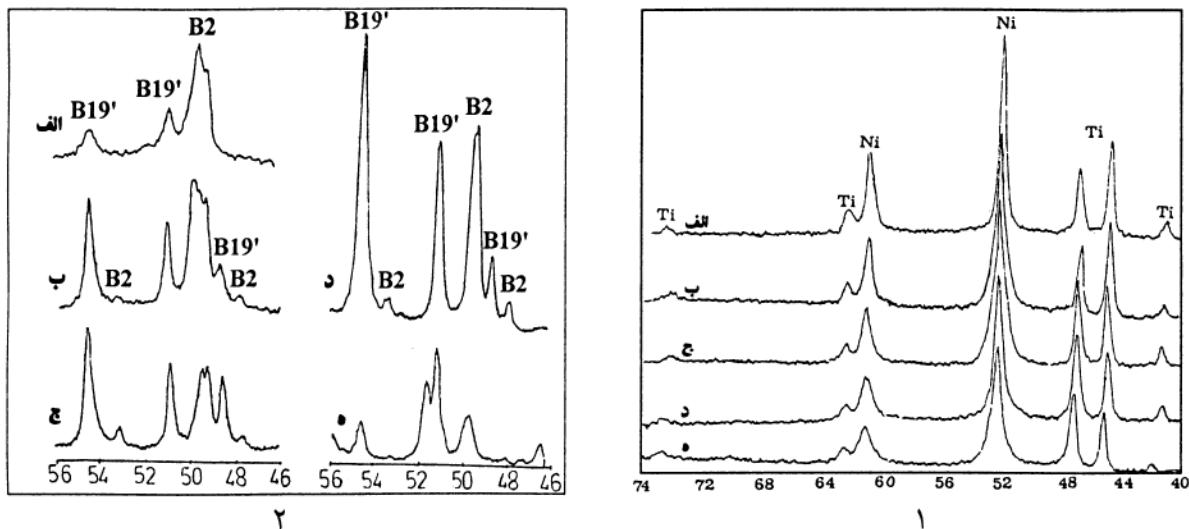
۱- لایه ای به ضخامت یک تا دو برابر قطر ذرات به بدنه گلوله می چسبد. به علت جوش خوردن ذرات ریز و خورد شدن ذرات درشت، درصد هر دو نوع نیز افزایید می یابد. به علت پیش افتادن پدیده جوش سرد نسبت به شکست ذرات درشت، کامپوزیتهای لایه ای به شکل دانه های درشت روی گلوله ها تشکیل می شود.

۲- ازدیاد ذرات هم محور در اثر خورد شدن ذرات صفحه ای انجام شده و ابعاد کامپوزیت کوچک می شود. در این مرحله حل شدن عنصر آلیازی در پودر فلز زمینه به دلیل افزایش موضعی درجه حرارت تسهیل خواهد شد. همچنین اعمال کار سرد بسیار زیاد بر روی پودرها مسیر هایی با انرژی محرکه کم را برای انجام فرآیند نفوذ خواهد کرد.

۳- با از بین رفتن جهات مرجع، جوش خوردن ذرات در جهات اتفاقی رویداده و در نتیجه محدود شدن ذرات مرکب و پودرهای درشت اتفاق می افتد.

۴- ذرات از نظر اندازه همگن شده و به پایداری نسبی می رسد [۷]. اگرچه در بعضی از ذرات تجمع عنصر آلیازی دیده می شود، اما ترکیب شیمیایی هر دانه به سمت ترکیب مورد نظر میل کرده و فواصل بین لایه های کامپوزیت به کمتر از یک میکرون خواهد رسید. در این مرحله سختی پودر به ماکریسم مقدار خود می رسد.

آنچه توضیح آن در اینجا ضروری به نظر می رسد نحوه جوش خوردن و شکست ذرات است. در واقع دانه های پودر در اثر اعمال کار سرد شدید به تدریج ترد شده و در نهایت می شکنند در اثر شکست دانه های پودر سطوح تمیز و فعالی ایجاد می شوند که اگر با سطوح فعال دیگر برخورد کنند برای کاهش انرژی سطحی و در اثر اعمال ضربه ای مدادوم جوش خواهند خورد [۸]. نخ



شکل ۴-۱- نتایج آنالیز XRD نمونه های ساخته شده توسط آسیاب اتریتور: ۱ الف Z5 ب Z6 ج Z7 د Z8 و ۲ ز ۹ و Z2 و Z8 و Z9 و Z7 و الف ب BA3، ج BA4، د BA5 و ه BA6. توجه کنید که  $B19'$  نشانده نه فاز مارنژیت و B2 نشانده نه فاز آستینیت است.

آلیاز سازی مکانیکی به میزان سطح تماس ذرات پودر و شار نفوذ واکنشگرها به سمت محل انجام واکنش تولید آلیاز بستگی دارد. مساحت سطح تماس و شار نفوذ به عواملی همچون چگالی، تقاضا ساختاری، دمای موضعی و مورفلوژی فاز وابسته است [۹]. لذا پارامترهایی که سبب تغییر میزان عوامل فوق هستند - مانند زمان آسیابکاری، نسبت وزن گلوله به وزن پودر، قطر گلوله های آسیابکاری، شکل و اندازه ذرات پودر و دمای موضعی در محل واکنش - همگی بر بازدهی تولید آلیاز تاثیر می گذارند. انرژی آسیابکاری بر تولید فازهای مختلف و خصوصیات آلیاز بدست آمده تاثیر بسزایی دارد. نتایج بررسیهای انجام شده در باره نوع ترکیبات بوجود آمده در اثر آلیاز سازی مکانیکی در جدول ۳ نشان داده شده است. تاثیر زمان آسیابکاری بر مقدار ترکیب یین فلزی  $Ni_3Ti$  بوجود آمده در اثر آسیابکاری در شکل ۵ نشان داده شده است. تحقیقات مفصل انجام شده در سالهای اخیر در باره کار پذیری آلیاز تیتانیوم نیکل، اهمیت این فاز را از دیدگاه خواص آلیاز تا حد زیادی آشکار ساخته است.

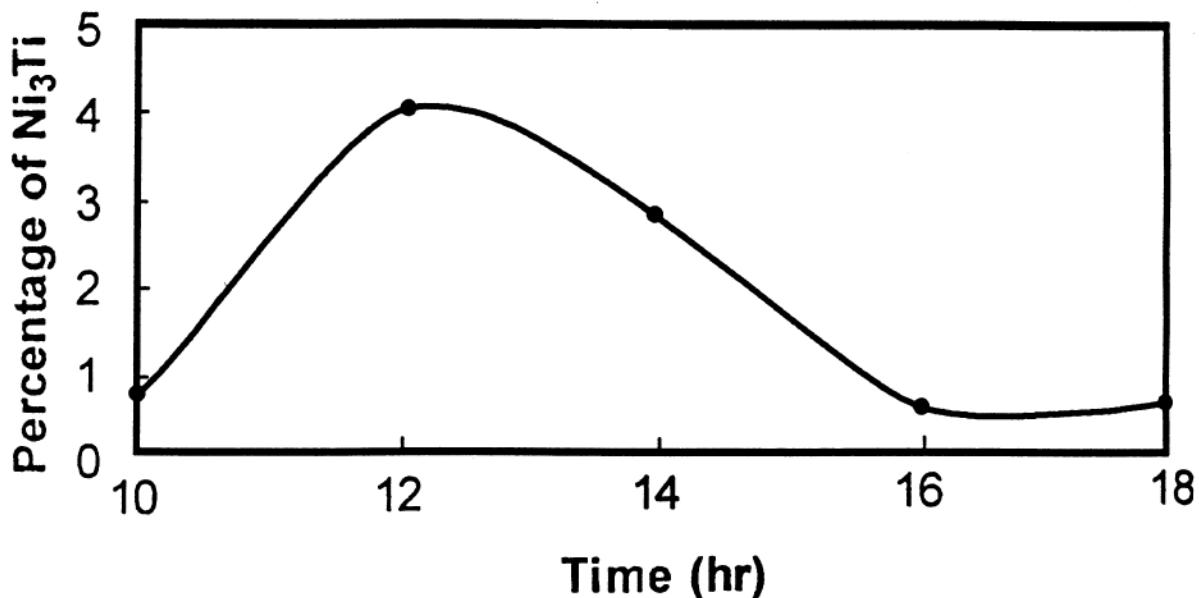
### نتیجه گیری

اگر چه ساخت پودرهای آمورف و نیمه کریستاله حافظه دار و سوپر الستیک از جنس آلیازهای خانواده تیتانیوم و نیکل مانند تیتانیوم-نیکل-کالت با استفاده از آسیابهای مختلف از جمله آسیاب سیاره ای و آسیاب اتریتور امکان پذیر است، اما به دلیل مقدار و سرعت بسیار جزیی فرایند تولید لازم است انرژی کافی از طریق بکارگیری زمانهای طولانی آسیابکاری، دور بالای آسیاب و نسبتهای بهینه گلوله به پودر تامین شود. ساختار پودرهای بدست آمده نه تنها می تواند از نوع آمورف باشد، بلکه تحت شرایط کنترل شده می تواند بصورت نیمه کریستاله یا نانومتریال باشد. با توجه به خواص ویژه و بینظیر پودرهای آلیاز شده به شیوه مکانیکی، این مواد می توانند در ساخت سیستمهای هوشمند، ایمپلانتهای جراحی استخوان و مواد زیستی مورد استفاده قرار گیرند. آزمایش‌های انجام شده نشان می دهند که مقدار آمورف شدن تابع انرژی آسیابکاری و نسبت وزنی بار به گلوله است. مقدار ترکیبات یین فلزی با افزایش زمان آسیابکاری کاهش یافته و با افزایش انرژی ذخیره شده در اثر آسیابکاری، اندازه دانه ها کاهش یافته و دمایهای تغییر حالت تحت تاثیر قرار می گیرند.



جدول ۳ - ترکیب شیمیایی رسوبات و زمینه در نمونه تولید شده از طریق زینتر کردن پودر بدست آمده از طریق آلیاژسازی مکانیکی.

Shape	Ni atom%	Ti atom%	Compound
Sharp Edge	75.60	27.20	$\text{Ni}_3\text{Ti}$
Round	57.76	42.57	$\text{Ni}_3\text{Ti}_2$
Matrix	49.36	50.69	$\text{NiTi}$



شکل ۵ - تاثیر زمان آسیابکاری بر مقدار فاز تاپايدار  $\text{Ni}_3\text{Ti}$  در نمونه تولید شده از طریق زینتر کردن پودر بدست آمده از طریق آلیاژسازی مکانیکی.

### قدردانی

بدینوسیله از تامین بودجه لازم برای اجرای این طرح توسط معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی شریف قدردانی می شود.

### مراجع

1. Tang, N. Y., Discussion of Kinetics and Phase Transformation Evaluation of Fe-Zn-Al Mechanically Alloyed Phases, Metallurgical and Materials Transactions A, Vol.28A, November 1997, pp 2433-2435.
2. Chank, Y., Berger, S. B., Weiss, Z. and Broolc, L., Solid State Amorphization by Mechanical Alloying- An Atomistic Model, Acta Matter., Vol. 42, No. 11, 1994, pp 3679-3685.
3. Morris, D. G., Morris, M. A., NiTi Inter Metallic by Mixing and Inter Diffusing Elemental Components, Mat. Sci & Eng. A, Vol. 110, 1989, pp 139-149.
4. Takasaki, A., Mechanical Alloying of the Ni-Ti System, Physic Stat. Sol., Vol. 169, 1998, p 183.
5. Rydin, R. W., Maurice, D. and Courtney, T. H., Milling Dynamics: Part I, Attritor Dynamics: Results of Cinematographic Study, Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 24, 1993, pp 175-185.



6. Cook, T. M. and Courtney, T. H., The Effect of Ball Size Distribution on Attritor Efficiency, Metall. & Mater. Trans. A, Vol. 26, 1994, pp 2389-2397.
7. Murty, B. S., Rao, M. and Ranganathan, S., Milling Maps and Amorphization During Mechanical Alloying,, Acta Metal. Mater., Vol 43, No. 6, 1995, pp 2443-2450.
8. Benjamin, J. S., Volin, T., The Mechanism of Mechanical Alloying, Metal. Trans., Vol. 5, Aug. 1974, pp 1929-1934.
9. Bever, M. B., Encyclopedia of Material Science and Engineering, 1<sup>st</sup> Ed., Pergamon Press, pp 1986.
10. Wang, K. Y., Shen, T. D., Wang, J T. and Quan, M X., Amorphization Reaction During Mechanical Alloying: Influence of the Milling Atmospheres, Scripta Metallurgica et Materialia, Vol. 25, No. 10, 1991, pp 2227-2231.
11. Maurice, D. and Courtney, D., Milling Dynamics: Part II. Dynamic of a SPEX Mill and a One Dimensional Milling, Metal. & Mater. Trans. A, Vol. 27, 1996, pp 1973-1979.
12. Koch, C. C., The Synthesis and Structure of Nanocrystalline Materials Produced by Mechanical Attrition, Nanostructured Materials, Vol. 2, 1993, pp 109-129.
13. Fecht, C. C., Helstern, E., Fu, Z. and Johnson, W. L., Nanocrystalline Metals Prepared by High-Energy Ball Milling, Metallurgical Transactions A, Vol. 21A, 1990, pp 2333-2337.
14. Abdellaui, M. and Gaffet, B., The Physics of Mechanical Alloying in A Planetary Ball Mill: Mathematical Treatment, Acta Metallurgica et Materialia, Vol. 43, No.3, 1995, pp 1087-1098.
15. Liaghat, G. H., Nouri, M. D. and Darvizeh, A., Effect of Impact Parameters on Explosive Welding of Tube to a Plug, IJE Transactions B: Applications, Vol. 15, No. 3, October 2002, pp 285-298.
16. Calka, A., Mechanical Alloying: Technology and Properties of Prepared Materials, Key Engineering Materials, Vol. 81-83, 1993, pp 17-24.
17. Koch, C. C. and Whittenberger, J. D., Mechanical Milling/Alloying of Intermetallics, Intermetallics, Vol. 4, 1996, pp 339-355.
18. Bhattachaiya, A. K. and Arzt, E., Plastic Deformation and Its Influence on Diffusion Process During Mechanical Alloying, Scripta Metallurgica et Materialia, Vol. 28, 1993, pp 389-400.
19. Suryanarayana, C., Chen, C. G. and Fores, F. H., Milling Maps for Phase Identification During Mechanical Alloying, Scripta Metallurgica et Materialia, Vol. 26, 1992, pp 1727-1732.
20. Stoloff, N. S. and Liu, C. T., Emerging Applications of Intermetallics, Intermetallics, Vol. 8, 2000, pp 1313-1320.
21. Liu, C. T. and Pope, D. P., Intermetallic Compound: Practice, Vol. 2, John Wiley, NY, 2000, pp 17-47.
22. Westbrook, J. H. and Fleischer, R. L., Intermetallic Compound: Structural Application, Vol. 3, John Wiley, New York, 2000.
23. Badmos, A. Y. and Bhadeshia; H. K. D. H., The Evolution of Solutions: A Thermodynamic Analysis of Mechanical Alloying, Metall. Trans. A, Vol. 28, Nov. 1997, pp 2189-2194.
24. Cullity, B. D., Elements of X Ray Diffraction, 2<sup>nd</sup> Edition, Addison Wesley Publishing Company, Inc., 1978, p 282.