

## اثر افزودنی منیزیم-ویتون بر رفتار حرارتی مخلوط‌های ترمیتی Al/nm-CuO

علی شیخ پور<sup>۱</sup>، سید قربان حسینی<sup>۲\*</sup>، سعید توانگر<sup>۳</sup>، محمد حسین کشاورز<sup>۴</sup>  
۱- دانشجوی دکترا، ۲- دانشیار، ۳- استادیار، ۴- استاد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر- تهران  
(تاریخ وصول: ۹۵/۷/۲۸، تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۵)

### چکیده

ترمیت‌های سنتی عموماً از ذرات آلومینیم میکرو تشکیل شده‌اند. این گونه از ترمیت‌ها معمولاً ویژگی‌های واکنش‌پذیری ضعیفی نظیر آزادسازی گرمای اندک و دمای اشتعال بالا ارائه می‌دهند. در این پژوهش، اثر افزودنی منیزیم-ویتون بر رفتار حرارتی ترمیت‌های Al/CuO با استفاده از روش‌های آنالیز حرارتی مورد بررسی قرار گرفت. در این مقاله، مخلوط‌های ترمیتی به دو روش تهیه شدند. در روش اول، از اختلاط فیزیکی ساده برای تهیه ترمیت‌های  $\mu\text{-Al/nm-CuO}$  و  $\text{nm-Al/nm-CuO}$  استفاده شد. در روش دیگر، مخلوط‌های  $(\mu\text{-Al/nm-CuO})+\text{Mg/Viton}$  و  $(\text{nm-Al/nm-CuO})+\text{Mg/Viton}$  با استفاده از روش حلال-ناحلال تهیه شدند. نتایج آنالیز حرارتی نشان داد که مخلوط  $(\mu\text{-Al/nm-CuO})+\text{Mg/Viton}$  در  $781.9^\circ\text{C}$  مشتعل می‌شود و انرژی چشمگیری برابر  $2621.4 \text{ Jg}^{-1}$  آزاد می‌کند. تحلیل رفتار حرارتی این مخلوط نشان داد که واکنش نیتريداسیون افزودنی منیزیم در هوا باعث آغازش واکنش ترمیتی بین آلومینیم و اکسید مس می‌گردد. همچنین داده‌های TG-DSC مخلوط  $(\text{nm-Al/nm-CuO})+\text{Mg/Viton}$  بیانگر این واقعیت است که افزودن منیزیم-ویتون تأثیر محسوسی بر بازدهی حرارتی ترمیت  $\text{nm-Al/nm-CuO}$  ندارد.

واژه‌های کلیدی: ترمیت Al/CuO، افزودنی منیزیم-ویتون، آنالیز حرارتی، دمای اشتعال، گرمای واکنش.

## Magnesium-Viton Additive Effect on the Thermal Behavior of Al/nm-CuO Thermite Mixtures

A. Sheikhpour, S. G. Hosseini\*, S. Tavangar, M. H. Keshavarz

Maleke Ashtar University of Technology, Tehran  
(Received: 4/6/2016, Accepted: 12/25/2016)

### Abstract

Traditional thermites are generally composed of micron-Al particles. These kinds of thermites usually exhibit poor reactivity characteristics such as a poor heat release and high ignition temperature. In this research, the influence of Mg-Viton<sup>2</sup> as additive on the thermal behavior of Al/CuO systems was verified using thermal analysis techniques. In this paper, thermite mixtures are prepared using two approaches. In one, simple physical mixing was used to prepare  $\mu\text{-Al/nm-CuO}$  and  $\text{nm-Al/nm-CuO}$  thermites. In the other approach, the  $(\mu\text{-Al/nm-CuO})+\text{Mg/Viton}$  and  $(\text{nm-Al/nm-CuO})+\text{Mg/Viton}$  mixtures were prepared using solvent/nonsolvent method. Thermal analysis results indicated that the  $(\mu\text{-Al/nm-CuO})+\text{Mg/Viton}$  mixture is ignited at  $781.9^\circ\text{C}$  with significant heat of reaction of  $2621.4 \text{ Jg}^{-1}$ . Analysis of thermal behavior of this mixture showed that the nitridation of magnesium additive in air initiates the thermite reaction between Al and CuO. Moreover, TG-DSC data of the  $(\text{nm-Al/nm-CuO})+\text{Mg/Viton}$  mixture indicated that the addition of Mg-viton has no significant effect on the thermal efficiency of  $\text{nm-Al/nm-CuO}$  thermite.

**Keywords:** Al/CuO Thermite, Mg/Viton Additive, Thermal Analysis, Ignition Temperature, Heat of Reaction.

## ۱- مقدمه

در تحقیقی که توسط شن و همکارانش [۱۳] انجام شد، از نانوذرات نقره برای بهبود خواص نانو ترمیت Al/CuO استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد با افزودن نانوذرات نقره به این مخلوط ترمیتی، دمای اشتعال آن از  $607/8^{\circ}\text{C}$  به  $567/6^{\circ}\text{C}$  کاهش می‌یابد؛ ولیکن باعث کاهش گرمای واکنش از  $1834/9\text{ J/g}$  به  $1486/2\text{ J/g}$  می‌شود. اگرچه افزودنی‌ها باعث بهبود برخی خواص مربوط به ترمیت‌ها شده‌اند، ولی استفاده از آن‌ها مشکلاتی را نیز ایجاد می‌کند. به عنوان مثال مشکل ترکیب  $\text{Si-Bi}_2\text{O}_3$ ، حساسیت بالای آن به تخلیه الکتریسیته ساکن<sup>۸</sup> است و افزودن نانوذرات نقره نیز علاوه بر افزایش هزینه، سبب کاهش انرژی سیستم خواهد شد [۷ و ۱۳].

در این تحقیق از افزودنی منیزیم-ویتون برای بهبود خواص حرارتی مخلوط ترمیتی Al-CuO استفاده شد و اثرات آن به روش‌های گرما-وزن سنجی<sup>۹</sup> (TG) و کالریمتری روبشی تفاضلی<sup>۱۰</sup> (DSC) مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش سعی شد با استفاده از یک افزودنی نسبتاً ارزان قیمت شامل ویتون و منیزیم میکرو، خواص عملکردی مخلوط‌های ترمیتی آلومینیم-اکسیدمس بهبود یابد. همچنین به طور همزمان، اثر اندازه ذره سوخت آلومینیم بر رفتار حرارتی مخلوط‌های تهیه شده بررسی شد. با استفاده همزمان از این دو متغیر (اندازه ذره و افزودنی) سعی شد تا ترکیبات ترمیتی بهینه‌ای تولید شود که علاوه بر داشتن دمای اشتعال پایین‌تر، دارای حداکثر مقدار انرژی تولیدی باشند. تهیه ترکیبات مذکور باعث حل اصلی‌ترین مشکل ترمیت‌ها یعنی واکنش-پذیری کم آن‌ها خواهد شد.

## ۲- بخش تجربی

## ۲-۱- دستگاه‌ها

مورفولوژی، اندازه ذره، کلوخه بودن و کیفیت اختلاط مواد اولیه و مخلوط‌های تهیه شده به وسیله میکروسکوپ الکترونی FE-SEM<sup>۱۱</sup> ساخت شرکت زیس-زیگما<sup>۱۲</sup> مورد بررسی قرار گرفت. همچنین بررسی رفتار حرارتی مواد اولیه و مخلوط‌های تهیه شده، با استفاده از دستگاه آنالیز حرارتی همزمان گرما-وزن سنجی و کالریمتری روبشی تفاضلی<sup>۱۳</sup> (TG-DSC) ساخت شرکت متلر تولدو<sup>۱۴</sup> با سرعت گرمادهی  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  ۲۰ در بازه دمایی  $^{\circ}\text{C}$  ۱۰۰۰-۲۵ انجام شد. متوسط جرم نمونه‌ها در حدود ۲ میلی‌گرم بود و از اتمسفر هوا برای بررسی رفتار حرارتی آن‌ها استفاده شد.

فلزات به دلیل دارا بودن آنتالپی احتراقی حجمی و جرمی بالا، به عنوان مواد با چگالی انرژی بالا<sup>۱</sup> بسیار مورد توجه هستند. به ویژه آلومینیم و منیزیم که در بسیاری از فرمولاسیون‌های مواد منفجره، پیش‌رانه‌ها و مواد پیروتکنیک مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۱ و ۲]. بعلاوه، این فلزات می‌توانند در ترکیب با اکسیدهای فلزی (به عنوان ترمیت<sup>۲</sup>)، با فلزات دیگر (به عنوان ترکیبات بین فلزی<sup>۳</sup>) و یا همراه پلیمرهای فلئوئورداری نظیر تفلون و ویتون<sup>۴</sup> بکار برده شوند [۳].

ترمیت‌ها دسته‌ای از مخلوط‌های پیروتکنیکی هستند که یک واکنش اکسیداسیون-احیای گرمازا تولید می‌کنند. این ترکیبات به دلیل توانایی در تولید گرمای واکنش و دمای احتراق بالا مورد توجه قرار دارند [۴ و ۵]. احتراق ترکیبات ترمیتی سنتی که معمولاً در آن‌ها از سوخت آلومینیم میکرو استفاده شده است، به انتقال جرم ناهمگن<sup>۵</sup> و با سرعت پایین از طریق سطح مشترک ذرات سوخت و اکسیدکننده محدود می‌شود [۶]. به همین دلیل مخلوط‌های ترمیتی حاوی سوخت آلومینیم میکرو معمولاً دارای دمای اشتعال بالایی هستند. بررسی‌های ایلونگا و همکارانش [۷] نشان داد دمای شروع اشتعال برای مخلوط ترمیتی حاوی آلومینیم میکرو و اکسید مس نانو برابر  $^{\circ}\text{C}$  ۹۳۹ است. دمای اشتعال بالا ( $^{\circ}\text{C}$  ۹۰۰ > دمای اشتعال) و گرمای واکنش کم، کاربرد این ترمیت‌ها را محدود ساخته است [۸ و ۹].

یک راه حل برای رفع این مشکل، استفاده از سوخت‌ها و اکسیدکننده‌های نانو سائز است. کاهش اندازه ذره اجزاء، تماس بین ذرات را بهبود داده و فضای سطحی<sup>۶</sup> در دسترس را افزایش می‌دهد [۱۰]؛ بنابراین می‌تواند باعث افزایش واکنش‌پذیری مخلوط‌های ترمیتی شود. ولیکن استفاده از مواد با اندازه نانو مشکلاتی نیز ایجاد می‌کند که از آن جمله قیمت بالا، کلوخه شدن<sup>۷</sup>، افزایش حساسیت و همچنین مشکلاتی در حوزه پایداری شیمیایی و طول عمر است [۱۱]. یک راه حل دیگر برای بهبود خواص حرارتی ترکیبات ترمیتی، استفاده از افزودنی‌ها است. در تحقیقی که توسط وانگ و همکارانش [۱۲] انجام شد، آن‌ها موفق شدند دمای آغازش نانو ترمیت Al/CuO را با افزودن نیتروسولولز به  $^{\circ}\text{C}$  ۵۷۰ کاهش دهند. همچنین اثر افزودن حساس کننده  $\text{Si-Bi}_2\text{O}_3$  بر اشتعال مخلوط Al/CuO توسط ایلونگا و همکارانش [۷] مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد افزودن ترکیب  $\text{Si-Bi}_2\text{O}_3$  به ترمیت Al/CuO باعث می‌شود دمای اشتعال از  $^{\circ}\text{C}$  ۹۴۲ به  $^{\circ}\text{C}$  ۶۸۹ کاهش یابد. جالب اینکه اگر اندازه ذرات ترمیت و حساس کننده نانو شود، دمای اشتعال باز هم کاهش می‌یابد و به  $^{\circ}\text{C}$  ۶۱۳ خواهد رسید.

8- Electro Static Discharge (ESD)

9- Thermogravimetry

10- Differential Scanning Calorimeters

11- Field Emitting Scanning Electron Microscope

12- Zeiss Sigma

13- Simultaneous Thermogravimetry -Differential Scanning Calorimetry

14- Mettler Toledo

1- High Energy Dense Materials

2- Thermite

3- Intermetallic Materials

4- Viton

5- Heterogeneous Mass Transfer

6- Surface Area

7- Agglomeration

## ۲-۲- مواد

روش حلال-ناحلال تهیه شد [۱۶]. در این روش، ۰/۰۵ گرم ویتون در ۱۰ میلی لیتر استون حل شد. سپس ۰/۹۵ گرم مخلوط پودرهای آلومینیم، منیزیم و اکسید مس به آن اضافه شد. بعد از یک مدت کوتاه هم زدن بر روی همزن مغناطیسی با سرعت ۶۰ rpm، مقدار ۳۰ میلی لیتر هگزان نرمال که به عنوان ضد حلال برای عامل پوشش دهی (ویتون) عمل می کند، به مخلوط در حال هم خوردن اضافه گردید. فرایند افزودن ضد حلال به مخلوط در مدت یک ساعت انجام شد. تصاویر FE-SEM مربوط به مخلوط‌های  $\mu\text{m}-\text{Al}/\text{nm}-\text{CuO}$  و  $\mu\text{m}-\text{Al}/\text{nm}-\text{CuO}+\text{Mg}/\text{Viton}$  در شکل (۲) آورده شده است. همان طور که در شکل (۲-الف) مشاهده می شود ذرات اکسید مس هم به صورت منفرد و هم به صورت کلوخه‌ای در کنار ذرات آلومینیم میکرو قرار دارند. شکل (۲-ب) نیز نشان‌دهنده این واقعیت است که ذرات آلومینیم میکرو و اکسید مس نانو بر روی ذرات بسیار بزرگ منیزیم میکرو قرار گرفته و به وسیله ویتون، پوشش داده شده‌اند.

## ۳- نتایج و بحث

## ۳-۱- رفتار حرارتی مواد خالص

نتایج آنالیز حرارتی مواد اولیه شامل آلومینیم میکرو، آلومینیم نانو، منیزیم میکرو و اکسید مس نانو در جدول (۱) و شکل (۳) آورده شده است.

همان طور که در شکل‌های (۳-الف) و (۳-ب) مشاهده می شود، آلومینیم خالص با اندازه ذرات میکرو یک پیک گرم‌ماگیر در  $659/7^\circ\text{C}$  دارد که مربوط به فرایند ذوب آن است؛ ولیکن این پیک برای پودر آلومینیم نانو در  $656/3^\circ\text{C}$  ظاهر می شود. گرانیب و پنتویا [۱۷] افزایش انرژی سطحی مربوط به نانوذرات را دلیل این تفاوت دانسته‌اند.

از طرف دیگر گرمای ذوب آلومینیم میکرو برابر  $345/0\text{ J g}^{-1}$  است، درحالی که این کمیت برای آلومینیم نانو برابر  $199/4\text{ J g}^{-1}$  است. این نتیجه با گزارش‌های قبلی نیز تطابق دارد؛ زیرا بر اساس نتایج تحقیقات گذشته، گرمای ذوب آلومینیم تابعی از اندازه ذره آن است [۱۸] و با کاهش اندازه ذره آلومینیم، گرمای ذوب آن کاهش می یابد [۱۹]. دلیل روند مذکور می تواند این واقعیت باشد که بلورهای کوچک تر دارای نقص شبکه بیشتری هستند که به عنوان سایت‌های فعال عمل می کنند. آن‌ها می توانند گرمای ذوب را به وسیله کاهش انرژی مورد نیاز برای شکستن شبکه بلور کاهش می دهند [۲۰]. افزایش جرم مشاهده شده در نمودار TG پودرهای آلومینیم خالص نیز مربوط به اکسیداسیون آن‌ها است.

در این پژوهش از آلومینیم میکرو ( $\mu\text{m}-\text{Al}$ ) با خلوص  $\geq 99\%$  با متوسط اندازه ذره ۱/۵ میکرومتر و آلومینیم نانو ( $\text{nm}-\text{Al}$ ) با خلوص  $\geq 95\%$  و متوسط اندازه ذره ۱۰۰ نانومتر، خریداری شده از شرکت مرک استفاده گردید. همان طور که در شکل‌های (۱-الف) و (۱-ب) نشان داده شده است، ذرات آلومینیم میکرو دارای شکل کروی و غیرکلوخه‌ای و ذرات آلومینیم نانو دارای شکل کروی و کلوخه‌ای هستند. از اکسید مس نانو ( $\text{nm}-\text{CuO}$ ) خریداری شده از شرکت آتور صنعت آبتین نیز به عنوان اکسیدکننده استفاده شد. این پودر دارای متوسط اندازه ذرات ۱۸۰ نانومتر بود و ذرات آن هم به صورت کلوخه‌ای و هم به صورت غیرکلوخه‌ای وجود دارند (شکل ۱-ج). همان طور که گفته شد در این تحقیق از افزودنی منیزیم-ویتون برای بهبود خواص حرارتی ترمیت  $\text{Al}-\text{CuO}$  استفاده گردید. پودر منیزیم میکرو ( $\mu\text{m}-\text{Mg}$ ) با خلوص  $\geq 99\%$  از شرکت مرک خریداری شد و اندازه ذرات آن ۴۰-۳۰ میکرومتر بود (شکل ۱-د). از ویتون A، با فرمول مولکولی  $\text{C}_5\text{H}_3\text{F}_7$  به عنوان عامل پوشش دهی<sup>۱</sup> استفاده شد. ویتون به عنوان منبع فلئوئر در بسیاری از کاربردهای پیرو تکنیکی استفاده می شود و یک فلئوئوروپلیمر است که توسط شرکت دوپونت<sup>۲</sup> تولید می شود. این فلئوئوروپلیمر دارای پایداری حرارتی خوب، انرژی سطح پایین، مقاومت به ضربه بالا و تورم<sup>۳</sup> کم در حلال‌های هیدروکربنی بوده و به طور گسترده در پوشش دهی و پایداری مواد پرانرژی مورد استفاده قرار می گیرد [۱۴]. حلال‌های مورد استفاده در این تحقیق، هگزان نرمال و استون با گرید آزمایشگاهی بود که از شرکت مرک تهیه گردید.

## ۳-۲- تهیه نمونه‌ها

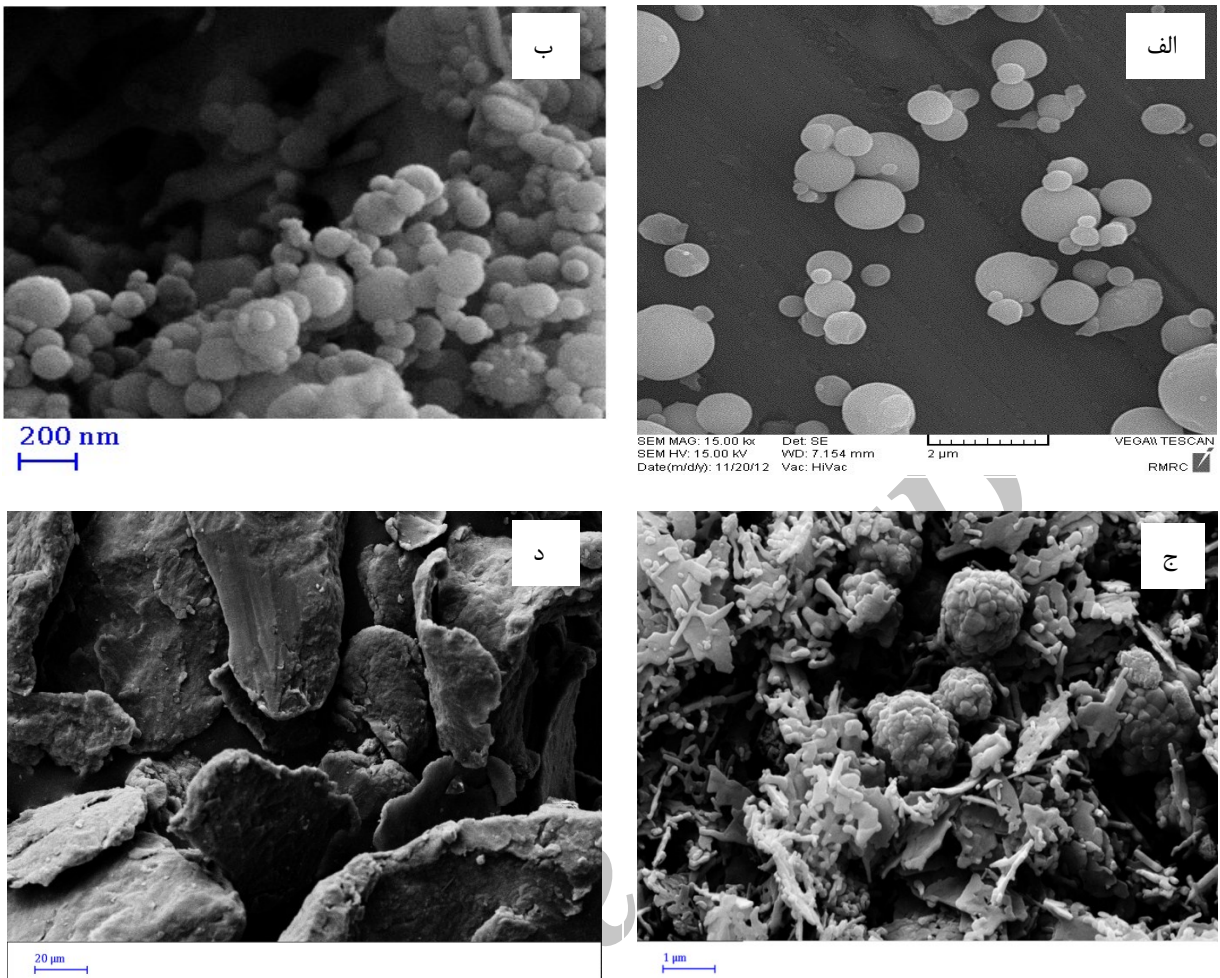
در این تحقیق از روش اختلاط فیزیکی ساده برای تهیه مخلوط‌های فاقد ویتون و روش حلال-ناحلال برای تهیه مخلوط‌های حاوی ویتون استفاده شد. برای تهیه مخلوط ترمیتی  $\text{Al}/\text{CuO}$  به روش اختلاط فیزیکی ساده، مخلوط پودرهای آلومینیم و اکسید مس در آسیاب شیشه‌ای حاوی هگزان آسیاب شد. سپس ظرف حاوی مواد به یک آون با دمای  $60^\circ\text{C}$  منتقل گردید تا هگزان نرمال تبخیر شود [۸]. نسبت اکی والانس سوخت به اکسیدکننده ( $\Phi$ ) برای این مخلوط برابر ۱/۱ در نظر گرفته شده که طبق تحقیق ساندرز و همکارانش [۱۵] دارای نرخ انتشار بهینه است.

مخلوط‌های چهار جزیی  $(\text{Al}/\text{CuO})+\text{Mg}/\text{Viton}$  با ترکیب درصد ۱۷/۵ آلومینیم، ۶۷/۵ اکسید مس، ۱۰٪ منیزیم و ۵٪ ویتون به

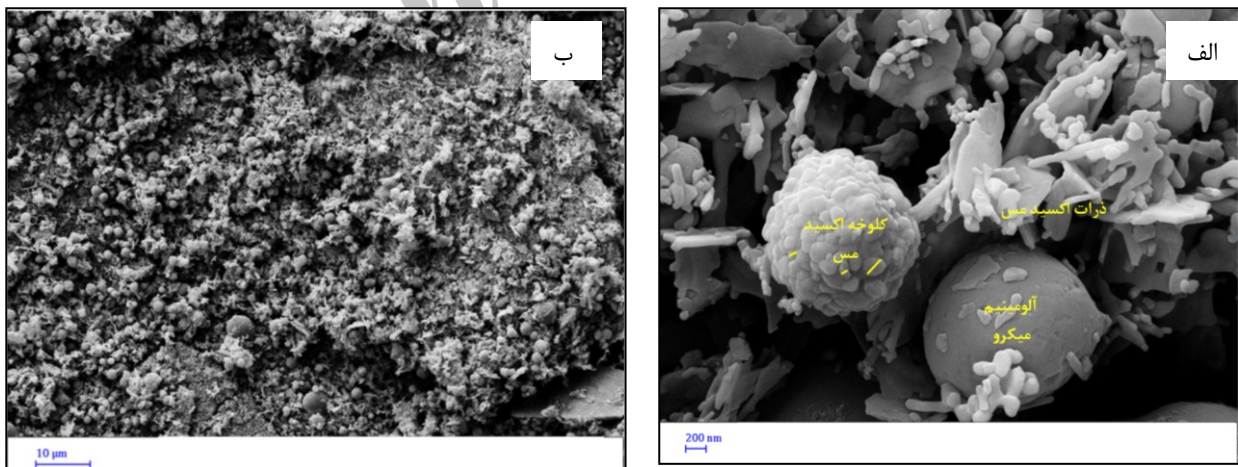
1- Coating Agent

2- Dupont

3- Swelling



شکل ۱- تصاویر FE-SEM مربوط به مواد اولیه: الف) آلومینیم میکرو، ب) آلومینیم نانو، ج) اکسید مس نانو و د) منیزیم میکرو.



شکل ۲- تصاویر FE-SEM مربوط به الف)  $\mu\text{m-Al/nm-CuO}$  [۲۶] و ب)  $(\mu\text{m-Al/nm-CuO})+\text{Mg/Viton}$ .

جدول ۱- خلاصه نتایج DSC مواد اولیه.

رویداد	نتایج DSC			ترکیب			ردیف
	گرمای واکنش (J g <sup>-1</sup> )	پیک گرماگیر (°C)	پیک گرمازا (°C)	افزودنی	اکسیدکننده	سوخت	
ذوب	-۳۴۵/۰	۶۵۹/۷	-	-	-	μm-Al	۱
ذوب	-۱۹۹/۴	۶۵۶/۳	-	-	-	nm-Al	۲
اکسیداسیون	۳۲۳/۲	-	۶۱۴/۴	-	-	μm-Mg	۳
ذوب	-۱۵۴/۸	۶۴۷/۷	-	-	-		
نیتريداسیون	۸۸۲/۶	-	۷۱۹/۶	-	-	nm-CuO	۴
تجزیه	-۷۱۵/۹	۹۱۶/۸	-	-	-		

### ۲-۳- رفتار حرارتی مخلوط‌های تهیه‌شده

در این پژوهش، جهت بررسی اثر افزودنی منیزیم-ویتون بر مخلوط‌های ترمیتی آلومینیم-اکسیدمس، دو مخلوط دو جزئی μm-Al/nm-CuO و nm-Al/nm-CuO و دو مخلوط چهار جزئی (μm-Al/nm-CuO)+Mg/Viton و (nm-Al/nm-CuO)+Mg/Viton حرارتی ارزیابی شدند. همه مخلوط‌های دو جزئی و چهار جزئی تهیه‌شده پودری بودند. ولیکن به دلیل وجود ویتون در ترکیب مخلوط-های چهار جزئی، این مخلوط‌ها نسبت به مخلوط‌های دو جزئی دارای چسبندگی ذرات بیشتری بودند. از نمودارهای TG-DSC مخلوط‌های سه جزئی (μm-Al/nm-CuO)+Mg و (nm-Al/nm-CuO)+Mg [۲۶] نیز جهت تحلیل نتایج آنالیز حرارتی مخلوط‌های تهیه‌شده استفاده گردید. این مخلوط‌های سه جزئی حاوی ۹۰ درصد وزنی Al/CuO با φ=۱/۱ و ۱۰ درصد وزنی منیزیم میکرو بودند. نتایج آنالیز حرارتی مخلوط‌های فوق‌الذکر در شکل (۴) و جدول (۲) ارائه شده است.

همان‌طور که در شکل (۴-الف) مشاهده می‌شود، مخلوط μm-Al/nm-CuO دارای دو پیک گرماگیر در دماهای ۶۵۸/۳ °C و ۸۶۴/۱ °C است که به ترتیب مربوط به ذوب آلومینیم و تجزیه اکسید مس هستند. از آنجا که هیچ‌گونه پیک گرمازایی در نمودار DSC این مخلوط مشاهده نمی‌شود، می‌توان گفت که واکنش ترمیتی بین آلومینیم میکرو و اکسید مس نانو تا دمای ۱۰۰۰ °C انجام نشده است. در مقابل، مخلوط nm-Al/nm-CuO دارای یک پیک گرمازا در ۶۳۰/۴ °C با گرمای واکنش ۹۴۹/۵ Jg<sup>-1</sup> است که به واکنش ترمیتی بین آلومینیم نانو و اکسید مس نانو مربوط است (شکل ۴-ب). این نتایج نشان می‌دهد که کاهش اندازه ذره سوخت منجر به کاهش دمای اشتعال مخلوط ترمیتی خواهد شد. این امر را می‌توان به این پدیده نسبت داد که کاهش اندازه ذره واکنشگرها به دلیل افزایش فصل مشترک<sup>۲</sup> بین سوخت و اکسیدکننده،

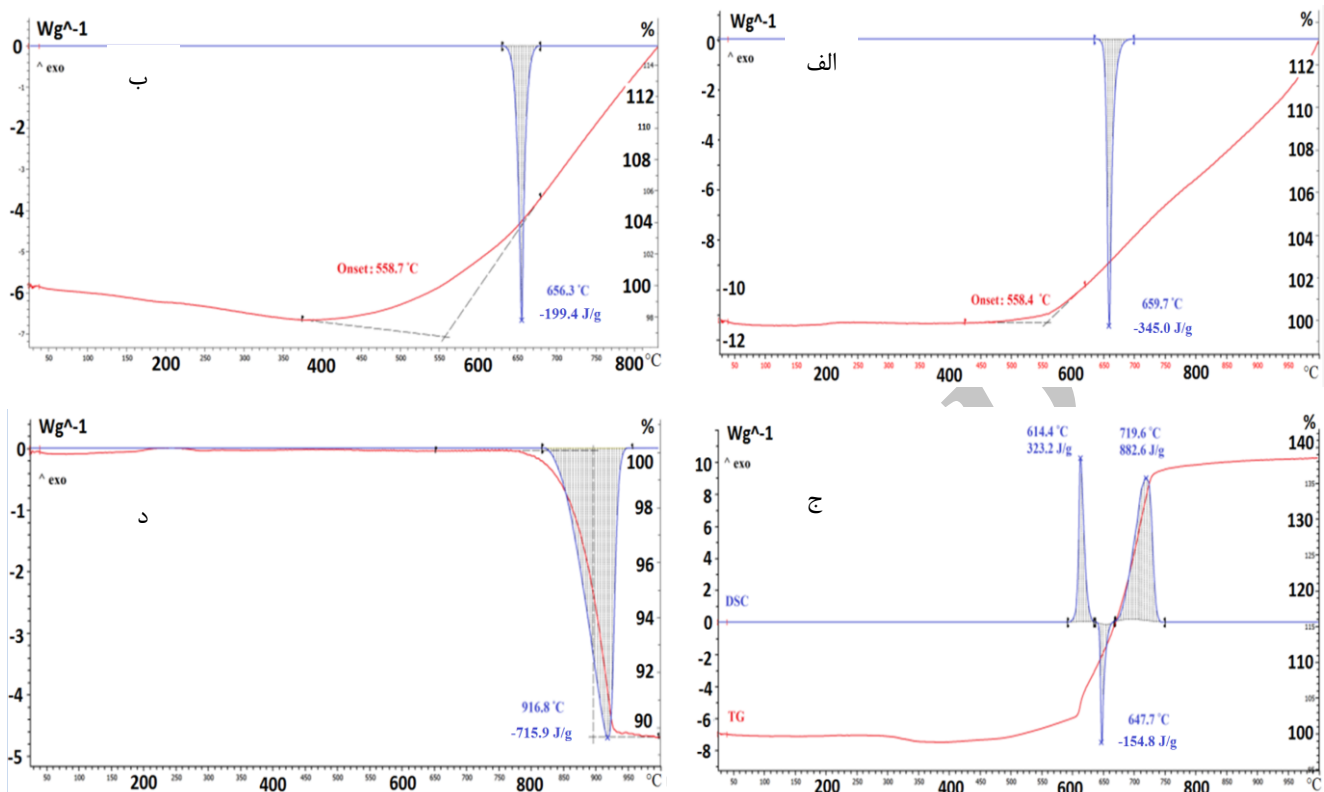
نمودارهای TG و DSC مربوط به پودر منیزیم میکرو در شکل (۳-ج) مشاهده می‌شود. همان‌طور که در نمودار TG آن مشخص است، تغییر جرم پودر منیزیم در دو بخش مجزا انجام می‌شود. در ابتدا یک افزایش جرم قبل از ۶۱۰ °C وجود دارد که مقدار آن در حدود ۲/۵٪ است که می‌تواند ناشی از اکسیداسیون سطحی ذرات منیزیم باشد. سپس یک افزایش جرم شدید در بازه ۶۱۰-۷۲۵ °C مشاهده می‌شود که مقدار آن در حدود ۳۶٪ است. این افزایش جرم به واکنش شدید بین هسته منیزیم و هوا نسبت داده می‌شود. در خلال این افزایش جرم، نمودار DSC پودر منیزیم دارای دو پیک گرمازای قوی در دماهای ۶۱۴/۴ °C و ۷۱۹/۶ °C است. این دو پیک می‌تواند مربوط به فرایندهای اکسیداسیون و نیتريداسیون ذرات منیزیم باشند که تطابق خوبی با نتایج مطالعات قبلی در خصوص پودر منیزیم دارد [۲۱]. همچنین در نمودار DSC منیزیم، یک پیک گرماگیر در ۶۴۷/۷ °C ظاهر می‌شود که مربوط به ذوب این فلز است. اکسید مس در بسیاری از ترکیبات پیروتکنیکی به عنوان اکسیدکننده استفاده می‌شود [۲۲]. گزارش‌های قبلی پژوهشگران [۲۳ و ۲۴] نشان داد که با افزایش دما، اکسید مس (II) با فرمول شیمیایی CuO به اکسید مس (I) با فرمول شیمیایی Cu<sub>2</sub>O که دارای پایداری بیشتری است تجزیه<sup>۱</sup> می‌شود. این پدیده با یک پیک گرماگیر در نمودار DSC و یک کاهش جرم شدید در نمودار TG همراه است. همان‌طور که در شکل (۳-د) مشخص است، تجزیه اکسید مس نانو در دمای ۹۱۶/۸ °C همراه با ۱۱٪ کاهش جرم انجام شد که تطابق کاملی با نتایج گزارش‌های قبلی دارد. همان‌طور که در نمودار DSC این اکسیدکننده مشخص است، اکسید مس (II) برای تبدیل به اکسید مس (I) به گرمایی برابر ۷۱۵/۹ J g<sup>-1</sup> نیاز دارد؛ یعنی CuO با دریافت این مقدار گرما به Cu<sub>2</sub>O تبدیل شده و اکسیژن مورد نیاز برای انجام واکنش‌های پیروتکنیکی را آزاد می‌کند. طبق پژوهش‌های قبلی، فرایند تجزیه اکسید مس، انرژی فعال‌سازی نسبتاً پایینی دارد و مقدار آن برابر ۶۰ kJ mol<sup>-1</sup> گزارش شده است [۲۵].

2- Interface

1- Decompose

است. زیرا در مخلوط‌های حاوی ذرات کوچک‌تر، انرژی حرارتی کمتری برای تشکیل نقاط داغ مورد نیاز خواهد بود [۲۷ و ۲۸].

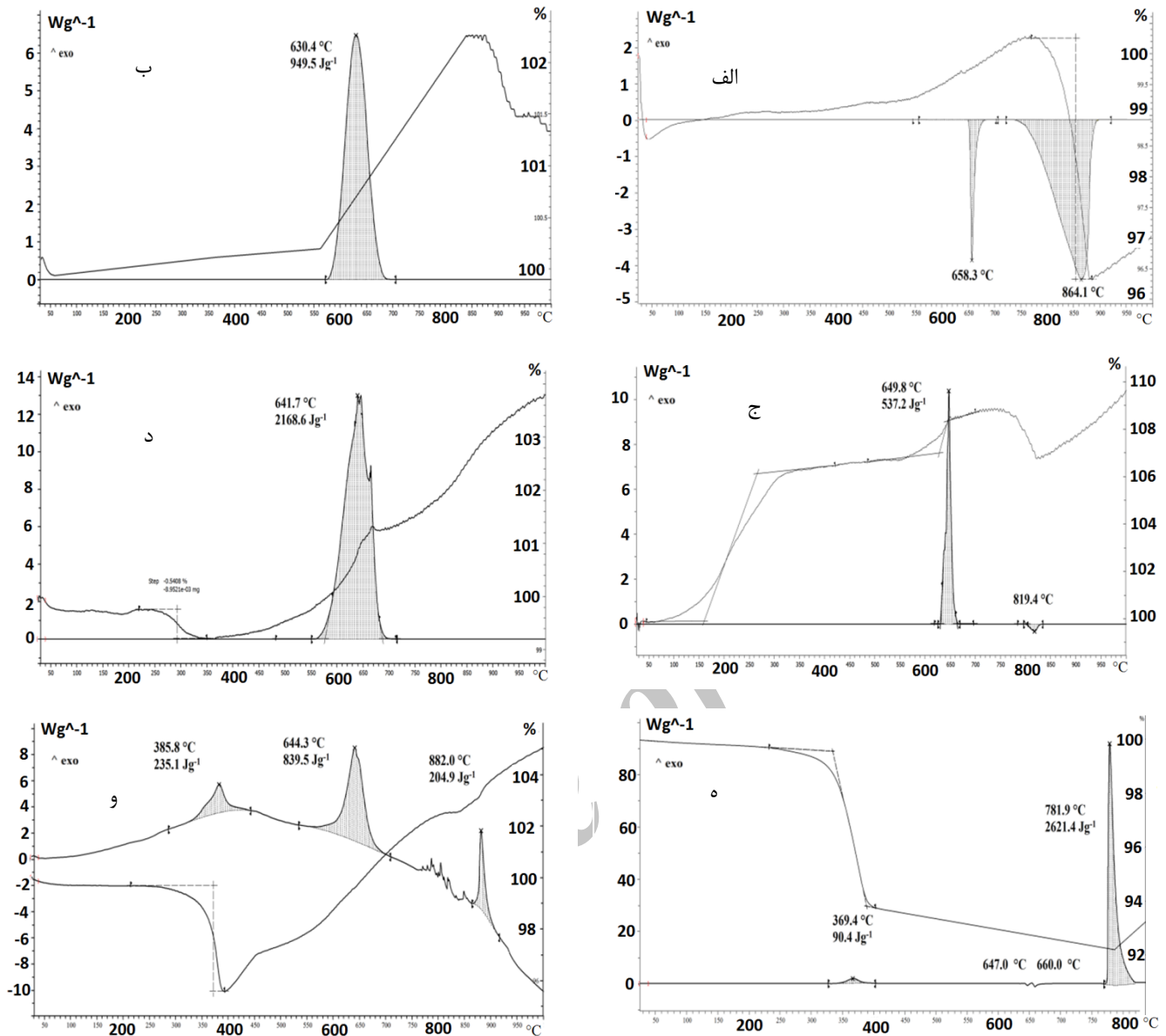
منجر به افزایش حساسیت مخلوط ترمیتی می‌شود [۲۰]. بعلاوه، تشکیل نقاط داغ نیز یکی از عوامل موثر بر حساسیت شمرده شده



شکل ۳- نمودارهای آنالیز حرارتی TG-DSC مربوط به مواد اولیه: الف) آلومینیم میکرو، ب) آلومینیم نانو، ج) منیزیم میکرو و د) اکسید مس نانو (سرعت گرمادهی ۲۰ °C/min).

جدول ۲- خلاصه نتایج DSC مخلوط‌های ترمیتی تهیه شده.

رویداد	نتایج DSC			ترکیب			ردیف
	گرمای واکنش (J g <sup>-1</sup> )	پیک گرماگیر (°C)	پیک گرمازا (°C)	افزودنی	اکسیدکننده	سوخت	
ذوب آلومینیم تجزیه اکسید مس	-۴۷/۶ -۴۵۴/۱	۶۵۸/۳ ۸۶۴/۱	-	-	nm-CuO (/۸۰)	μm-Al (/۲۰)	۱
تجزیه ویتون ذوب منیزیم ذوب آلومینیم نیتريداسیون منیزیم و واکنش ترمیتی	۹۰/۴ - - ۲۶۲۱/۴	-	۳۶۹/۴ ۶۴۷/۰ ۶۶۰/۰ ۷۸۱/۹	μm-Mg+Viton (/۱۰+ /۵)	nm-CuO (/۶۷/۵)	μm-Al (/۱۷/۵)	۲
واکنش ترمیتی	۹۴۹/۵	-	۶۳۰/۴	-	nm-CuO (/۸۰)	nm-Al (/۲۰)	۳
تجزیه ویتون واکنش ترمیتی آلومینیم و اکسید مس نانو نیتريداسیون منیزیم	۲۳۵/۱ ۸۳۹/۵ ۲۰۴/۹	-	۳۸۵/۸ ۶۴۴/۳ ۸۸۲/۰	μm-Mg/Viton (/۱۰+ /۵)	nm-CuO (/۶۷/۵)	nm-Al (/۱۷/۵)	۴



شکل ۴- نمودارهای آنالیز حرارتی مربوط به الف)  $(\mu\text{m-Al/nm-CuO})+\text{Mg}$ ، ب)  $(\text{nm-Al/nm-CuO})+\text{Mg}$ ، ج)  $(\mu\text{m-Al/nm-CuO})+\text{Mg}$ ، د)  $(\text{nm-Al/nm-CuO})+\text{Mg}$ ، ه)  $(\mu\text{m-Al/nm-CuO})+\text{Mg}$  و و)  $(\mu\text{m-Al/nm-CuO})+\text{Mg/Viton}$  (سرعت گرمادهی  $20^\circ\text{C/min}$ ).

با پدیده تجزیه اکسید مس مطابقت دارد نیز می‌تواند بیانگر این واقعیت باشد که مواد اولیه در طی واکنش گرمای، به طور کامل مصرف نشده‌اند. یعنی طی واکنش گرمای، سیستم بخش عمده انرژی خود را که مربوط به واکنش ترمیتی بین آلومینیم میکرو و اکسید مس است آزاد نمی‌کند. ذکر این مطلب ضروری است که به دلیل همپوشانی پیک گرمای مربوط به واکنش ترمیتی بین منیزیم و اکسید مس با پیک گرماگیر مربوط به ذوب آلومینیم، پیک گرماگیر مذکور قابل مشاهده نیست. این همپوشانی همچنین می‌تواند یکی از علل گرمای واکنش ناچیز مخلوط سه جزئی باشد.

در نمودار DSC مخلوط سه جزئی  $(\mu\text{m-Al/nm-CuO})+\text{Mg}$ ، تنها یک پیک گرمای در  $649.8/8^\circ\text{C}$  با گرمای واکنش  $537.2\text{ Jg}^{-1}$  وجود دارد (شکل ۴-ج). با توجه به گرمای واکنش ناچیز آن، به نظر می‌رسد این پیک مربوط به واکنش بین منیزیم و اکسید مس بوده و آلومینیم میکرو وارد واکنش نشده است. دمای انجام واکنش نیز موید این مطلب است؛ زیرا واکنش ترمیتی مخلوط دو جزئی  $\mu\text{m-Mg/nm-CuO}$  در دمای  $647/4^\circ\text{C}$  انجام می‌شود [۲۰]. بنابراین می‌توان گفت افزودن پودر منیزیم خالص به تنهایی نمی‌تواند باعث بهبود خواص حرارتی ترمیت  $\mu\text{m-Al/nm-CuO}$  شود. وجود پیک گرماگیر در  $819.4/4^\circ\text{C}$  که

ترمیت‌های پایه منیزیم معمولاً در نزدیکی نقطه ذوب فلز رخ می‌دهد، جایی که لایه اکسیدی که ذرات منیزیم را احاطه کرده، سست شده و فلز در معرض اکسیداسیون قرار می‌گیرد [۱۰]. مثلاً واکنش بین منیزیم میکرو و اکسید مس نانو در  $647/4^{\circ}\text{C}$  انجام می‌شود [۲۰]. بنابراین طبق انتظار، اشتعال ترکیب چهار جزیی ( $\mu\text{-Al/nm-}$ )  $\text{CuO}+\text{Mg/Viton}$  نیز می‌بایست در نزدیکی نقطه ذوب منیزیم ( $647/7^{\circ}\text{C}$ ) انجام شود. ولیکن همان طور که مشاهده شد، اشتعال این مخلوط در  $781/9^{\circ}\text{C}$  رخ داد. با توجه به این که واکنش بین منیزیم و اکسید مس در مخلوط سه جزیی ( $\mu\text{-Al/nm-CuO}+\text{Mg}$ ) نیز در  $649/8^{\circ}\text{C}$  و در دمایی نزدیک به نقطه ذوب منیزیم رخ می‌دهد (شکل ۴-ج)، به نظر می‌رسد ویتون مانع از انجام واکنش مخلوط چهار جزیی در نزدیکی نقطه ذوب منیزیم شده باشد.

بنابراین می‌توان مراحل واکنش مخلوط چهار جزیی ( $\mu\text{-Al/nm-}$ )  $\text{CuO}+\text{Mg/Viton}$  را به این صورت شرح داد که در  $369/4^{\circ}\text{C}$  ویتون تجزیه می‌شود. با افزایش یافتن دما و رسیدن به نقطه ذوب منیزیم، اثرات مربوط به تجزیه ویتون مانع از انجام واکنش ترمیتی بین منیزیم و اکسید مس می‌گردد. در این زمان منیزیم و آلومینیم موجود در سیستم، بدون انجام واکنش ترمیتی ذوب می‌شوند که وجود پیک‌های گرماگیر در  $647/0^{\circ}\text{C}$  و  $660/0^{\circ}\text{C}$  شاهدی بر این مطلب است. سپس فلزات مذاب، اکسید مس را به طور کامل احاطه می‌کنند. به این ترتیب فصل مشترک بین سوخت مذاب و ذرات اکسیدکننده به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، همان طور که در نمودار DSC منیزیم خالص مشاهده می‌شود دمای نیتريداسیون این فلز در هوا،  $719/6^{\circ}\text{C}$  است (شکل ۳-ج). طبق گزارش‌های قبلی، پیک گرمازای مربوط به واکنش بین منیزیم با هوا در دمایی حدود  $700^{\circ}\text{C}$  ظاهر می‌شود که در حضور پوشش ویتون می‌تواند به دمای بالاتری منتقل شود [۳۱، ۳۰]. بنابراین در مورد مخلوط چهار جزیی ( $\mu\text{-}$ )  $\text{Al/nm-CuO}+\text{Mg/Viton}$  به نظر می‌رسد ابتدا واکنش نیتريداسیون منیزیم در دمایی بالاتر از  $700^{\circ}\text{C}$  انجام شده و سپس گرمای حاصل از این واکنش باعث آغاز واکنش ترمیتی می‌شود. به دلیل فصل مشترک بالای بین فلزات مذاب و اکسید مس و همچنین انجام همزمان نیتريداسیون منیزیم و واکنش ترمیتی، انرژی بالایی برابر  $2621/4\text{ J.g}^{-1}$  توسط این مخلوط چهار جزیی آزاد می‌شود.

نمودار آنالیز حرارتی ترکیب چهار جزیی ( $\text{nm-Al/nm-}$ )  $\text{CuO}+\text{Mg/Viton}$  در شکل (۴-و) قابل مشاهده است. نمودار DSC این مخلوط دارای سه پیک گرمازا است. به نظر می‌رسد پیک گرمازای اول در  $385/8^{\circ}\text{C}$  که با یک کاهش جرم همراه است مربوط به تجزیه ویتون باشد [۲۹]. پیک‌های گرمازای دوم و سوم نیز به ترتیب در  $644/3^{\circ}\text{C}$  با گرمای واکنش  $839/5\text{ J.g}^{-1}$  و  $882/0^{\circ}\text{C}$  با گرمای واکنش  $204/9\text{ J.g}^{-1}$  مشاهده می‌شوند که در ادامه بررسی خواهند شد.

مقایسه نمودارهای آنالیز حرارتی مخلوط‌های ( $\mu\text{-Al/nm-}$ )  $\text{CuO}+\text{Mg/Viton}$  و ( $\text{nm-Al/nm-CuO}+\text{Mg/Viton}$ ) در شکل‌های (۴-)

همان طور که در شکل (۴-د) مشاهده می‌شود، در نمودار DSC مخلوط سه جزیی ( $\text{nm-Al/nm-CuO}+\text{Mg}$ )، تنها یک پیک گرمازا در  $641/7^{\circ}\text{C}$  با گرمای واکنش قابل توجه  $2168/6\text{ J.g}^{-1}$  وجود دارد. با بررسی این پیک درمی‌یابیم که پیک گرمازای مذکور متشکل از دو پیک به هم پیوسته است که می‌تواند مربوط به دو واکنش ترمیتی منیزیم-اکسید مس و آلومینیم-اکسید مس باشد. با مقایسه نتایج آنالیز حرارتی مخلوط‌های ترمیتی  $\text{nm-Al/nm-}$  و  $\text{nm-Al/nm-CuO}+\text{Mg}$  درمی‌یابیم که افزودن منیزیم خالص باعث افزایش قابل توجه گرمای واکنش سیستم می‌شود، ولی دمای اشتعال را چندان تغییر نمی‌دهد (شکل‌های ۴-ب و ۴-د). به نظر می‌رسد نزدیک بودن دمای اشتعال مخلوط‌های دو جزیی  $\text{nm-Al/nm-CuO}$  (با دمای اشتعال  $630/4^{\circ}\text{C}$ ) و  $\mu\text{-Mg/nm-CuO}$  (با دمای اشتعال  $647/4^{\circ}\text{C}$ ) [۲۰] باعث فعال شدن همزمان آن‌ها و در نتیجه آزادسازی انرژی قابل توجه مخلوط سه جزیی شده باشد. دوتایی بودن پیک گرمازای مخلوط سه جزیی ( $\text{nm-Al/nm-CuO}+\text{Mg}$ ) نیز موید این مطلب است.

در نمودارهای TG-DSC مخلوط چهار جزیی ( $\mu\text{-Al/nm-}$ )  $\text{CuO}+\text{Mg/Viton}$  که در شکل (۴-ه) ارائه شده است دو پیک گرماگیر کوچک در  $647/0^{\circ}\text{C}$  و  $660/0^{\circ}\text{C}$  مشاهده می‌شوند که به ترتیب مربوط به ذوب منیزیم و ذوب آلومینیم هستند. همچنین این مخلوط دارای دو پیک گرمازا است. پیک اول در  $369/4^{\circ}\text{C}$  که با یک کاهش جرم در نمودار TG همراه است می‌تواند مربوط به تجزیه ویتون باشد [۲۹]. پیک گرمازای دوم نیز در  $781/9^{\circ}\text{C}$  با گرمای واکنش  $2621/4\text{ J.g}^{-1}$  ظاهر شده است. با مقایسه نمودارهای DSC مخلوط‌های  $\mu\text{-Al/nm-CuO}+\text{Mg/Viton}$  و  $\text{Al/nm-CuO}+\text{Mg/Viton}$  و به ویژه گرمای واکنش چشمگیر مخلوط چهار جزیی می‌توان گفت افزودن ترکیب منیزیم-ویتون سبب فعال شدن واکنش بین آلومینیم میکرو و اکسید مس نانو شده و واکنشگرهای موجود در سیستم به طور همزمان وارد واکنش می‌شوند. این پدیده زمانی اهمیت بیشتری می‌یابد که بدانیم مخلوط‌های ترمیتی حاوی آلومینیم میکرو معمولاً دارای دمای اشتعال بالا و انرژی واکنش کم هستند و این امر یکی از اصلی‌ترین معایب استفاده از این مخلوط‌ها است. لازم به ذکر است گرمای واکنش این مخلوط چهار جزیی در مقایسه با مقادیر گزارش شده برای انواع ترمیت-ها در تحقیقات قبلی بسیار قابل ملاحظه است. طبق پژوهش‌های انجام شده، مقدار گرمای واکنش برای نانوترمیت  $\text{Al/CuO}$  برابر  $962\text{ J.g}^{-1}$ ، برای نانوسیم  $\text{CuO}$  پوشش داده شده با رسوب نانو آلومینیم برابر  $795\text{ J.g}^{-1}$  و برای نانوکامپوزیت  $\text{Al/Fe}_2\text{O}_3$  برابر  $1186\text{ J.g}^{-1}$  و برای نانوکامپوزیت  $\text{Al/MoO}_3$  برابر  $1024\text{ J.g}^{-1}$  است [۲۰]. علاوه بر این، همانطور که قبلاً ذکر شد ویتون می‌تواند باعث بهبود خواص ایمنی این مخلوط گردد.

حال چگونگی انجام واکنش‌های مخلوط چهار جزیی ( $\mu\text{-Al/nm-}$ )  $\text{CuO}+\text{Mg/Viton}$  بررسی می‌شود. همان طور که می‌دانیم اشتعال



می‌دهد، ولیکن این واکنش در مخلوط چهار جزئی در  $644/3^{\circ}\text{C}$  با گرمای واکنش  $839/5 \text{ Jg}^{-1}$  مشاهده می‌شود. یعنی بر خلاف ترمیت  $\mu\text{m-Al/nm-CuO}$ ، افزودن منیزیم-ویتون اثر محسوس بر بازدهی حرارتی ترمیت  $\text{nm-Al/nm-CuO}$  ندارد. اما بهبود خواص ایمنی مخلوط  $\text{nm-Al/nm-CuO}$  با افزودن منیزیم-ویتون چندان دور از ذهن نیست که نیاز به بررسی‌های بیشتری دارد.

#### ۴- نتیجه گیری

در گذشته تحقیقات فراوانی برای حل مشکل اساسی ترمیت‌ها، یعنی واکنش‌پذیری پایین آن‌ها انجام شده است. اگرچه نتایج این تحقیقات نشان داد که استفاده از سوخت‌ها و اکسیدکننده‌های نانوسایز و یا افزودن حساس‌کننده‌هایی نظیر  $\text{Si-Bi}_2\text{O}_3$  و نانوذرات نقره باعث افزایش واکنش‌پذیری ترمیت  $\text{Al/CuO}$  می‌شود؛ ولی استفاده از آن‌ها مشکلاتی را نیز ایجاد می‌کرد. در پژوهش حاضر، اثر ترکیب منیزیم-ویتون به عنوان افزودنی بر رفتار حرارتی مخلوط‌های ترمیتی  $\text{Al/CuO}$  مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزودن ترکیب منیزیم-ویتون باعث افزایش واکنش‌پذیری ترمیت  $\mu\text{m-Al/nm-CuO}$  می‌شود و دمای اشتعال آن را از دمای بیش از  $1000^{\circ}\text{C}$  به  $781/9^{\circ}\text{C}$  کاهش می‌دهد. بر اساس تجزیه و تحلیل نتایج آنالیز حرارتی مخلوط  $(\mu\text{m-Al/nm-CuO})+\text{Mg/Viton}$ ، این نتیجه حاصل شد که وجود ویتون در این مخلوط، مانع از انجام واکنش ترمیتی در نزدیکی نقطه ذوب منیزیم خواهد شد. با افزایش دما و ذوب فلزات موجود در سیستم، فصل مشترک بین سوخت مذاب و ذرات اکسیدکننده افزایش یافته و واکنش ترمیتی با گرمای واکنش قابل توجه  $2621/4 \text{ Jg}^{-1}$  در نزدیکی دمای نیتريداسیون منیزیم انجام می‌شود. این گرمای واکنش چشمگیر در مقایسه با مقادیر گزارش شده برای سایر ترمیت‌ها بسیار قابل ملاحظه است. نکته حائز اهمیت دیگر در این تحقیق این بود که از مواد میکروسایز و در دسترس مثل منیزیم میکرو و ویتون به عنوان افزودنی استفاده شد. همچنین با توجه به خواص منحصر به فرد ویتون، بهبود خواص ایمنی و طول عمر محصول نیز محتمل خواهد بود. یکی دیگر از نتایج این پژوهش این بود که نشان داد افزودن ترکیب منیزیم-ویتون اثر محسوس بر بازدهی حرارتی ترمیت  $\text{nm-Al/nm-CuO}$  ندارد.

#### مراجع

- [1] Schoenitz, M.; Dreizin, E. L. "Structure and Properties of Al-Mg Mechanical Alloys"; *J. Mater. Res.* 2003, 18, 1827-1836.
- [2] Aly, Y.; Schoenitz, M.; Dreizin, E. L. "Ignition and Combustion of Mechanically Alloyed Al-Mg Powders with Customized Particle Sizes"; *Combust. Flame* 2013, 160, 835-42.
- [3] Shawn, S. C. "Hydrodynamical Analysis of Nanometric Aluminum/Teflon Deflagrations"; Ph. D. Thesis, Texas, Tech. University, 2008.

و (۴- و) نشان می‌دهد که مخلوط حاوی آلومینیم میکرو دارای دو پیک گرمازا و مخلوط حاوی آلومینیم نانو دارای سه پیک گرمازا است. تفاوت در پیک دوم مخلوط  $(\text{nm-Al/nm-CuO})+\text{Mg/Viton}$  در  $644/3^{\circ}\text{C}$  است که در مخلوط  $(\mu\text{m-Al/nm-CuO})+\text{Mg/Viton}$  وجود ندارد. با توجه به این که تفاوت این دو مخلوط در اندازه ذره آلومینیم است، می‌توان نتیجه گرفت که پیک دوم در مخلوط  $(\text{nm-Al/nm-CuO})+\text{Mg/Viton}$  مربوط به واکنش ترمیتی بین آلومینیم نانو و اکسید مس نانو است. بدیهی است چون مخلوط چهار جزئی  $(\mu\text{m-Al/nm-CuO})+\text{Mg/Viton}$  فاقد آلومینیم نانو است، پیک گرمازایی در این محدوده نشان نمی‌دهد.

این نظر با بررسی رفتار حرارتی مخلوط  $\text{nm-Al/nm-CuO}$  نیز تأیید می‌شود (شکل ۴-ب)؛ زیرا دمای پیک گرمازای دوم در مخلوط  $(\text{nm-Al/nm-CuO})+\text{Mg/Viton}$  برابر  $644/3^{\circ}\text{C}$  است که در نزدیکی دمای اشتعال مخلوط  $\text{nm-Al/nm-CuO}$  ( $630/4^{\circ}\text{C}$ ) قرار دارد. دلیل این تفاوت اندک در دمای واکنش‌ها نیز می‌تواند به علت وجود پوشش ویتون در ترکیب مخلوط چهار جزئی باشد که باعث تأخیر در واکنش می‌گردد. همچنین مقایسه گرمای واکنش مخلوط‌های سه جزئی  $(\text{nm-Al/nm-CuO})+\text{Mg/Viton}$  و چهار جزئی  $(\text{nm-Al/nm-CuO})+\text{Mg/Viton}$  موید این مطلب است که در صورت وجود ویتون، واکنش منیزیم-اکسیدمس انجام نمی‌شود. زیرا پیک گرمازای مخلوط سه جزئی  $(\text{nm-Al/nm-CuO})+\text{Mg/Viton}$  در  $641/7^{\circ}\text{C}$  حاصل از واکنش‌های ترمیتی همزمان منیزیم-اکسیدمس و آلومینیم-اکسیدمس، دارای گرمای واکنش  $2168/6 \text{ Jg}^{-1}$  است [۲۶] که با افزودن ویتون به  $839/5 \text{ Jg}^{-1}$  (در دمای  $644/3^{\circ}\text{C}$ ) کاهش می‌یابد. یعنی یکی از دو واکنش ترمیتی منیزیم میکرو-اکسیدمس یا آلومینیم نانو-اکسیدمس در مخلوط چهار جزئی حاوی ویتون انجام نشده است که با توجه به دلایل فوق‌الذکر، واکنشی که انجام نشده است مربوط به منیزیم میکرو و نانو اکسید مس است.

همان طور که قبلاً در مورد مخلوط چهار جزئی  $(\mu\text{m-Al/nm-CuO})+\text{Mg/Viton}$  توضیح داده شد، پیک گرمازای سوم مخلوط چهار جزئی  $(\text{nm-Al/nm-CuO})+\text{Mg/Viton}$  می‌تواند مربوط به واکنش بین منیزیم با هوا باشد [۳۰، ۳۱]. همان طور که از مقایسه شکل‌های (۳-ج) و (۴-و) مشخص می‌شود، پیک گرمازای سوم در مخلوط چهار جزئی  $(\text{nm-Al/nm-CuO})+\text{Mg/Viton}$  با پیک حاصل از واکنش نیتريداسیون منیزیم خالص در هوا مطابقت دارد. دلیل تفاوت در دمای این واکنش‌ها نیز می‌تواند به علت وجود پوشش ویتون در ترکیب مخلوط چهار جزئی باشد [۳۰].

با بررسی نمودارهای آنالیز حرارتی دو مخلوط  $\text{nm-Al/nm-CuO}$  و  $(\text{nm-Al/nm-CuO})+\text{Mg/Viton}$  در می‌یابیم که واکنش ترمیتی در مخلوط دو جزئی در دمای  $630/4^{\circ}\text{C}$  با گرمای واکنش  $949/5 \text{ Jg}^{-1}$  رخ

- [19] Eckert, J.; Holzer, J. C.; Ahn, C. C.; Fu, Z.; Johnson, W. L. "Melting Behavior of Nanocrystalline Aluminum Powders"; *Nanostruct. Mater.* 1993, 2, 407.
- [20] Hosseini, S. G.; Sheikhpour, A.; Keshavarz, M. H.; Tavangar, S. "The Effect of Metal Oxide Particle Size on the Thermal Behavior and Ignition Kinetic of Mg-CuO Thermite Mixture"; *Thermochim. Acta* 2016, 626, 1-8.
- [21] Song, M.; Chen, M.; Zhang, Z. "Preparation and Characterization of Mg Nanoparticles"; *Mater. Charact.* 2008, 59, 514-518.
- [22] Hosseini, S. G.; Pourmortazavi, S. M.; Hajimirsadeghi, S. S. "Thermal Decomposition of Pyrotechnic Mixtures Containing Sucrose with either Potassium Chlorate or Potassium Perchlorate"; *Combust. Flame* 2005, 14, 322-326.
- [23] Chambers, C.; Holliday, A. K. "Modern Inorganic Chemistry"; Butterworth & Co., 1975.
- [24] Jian, G.; Chowdhury, S.; Sullivan, K.; Zachariah, M. R. "Nanothermite Reactions: Is Gas Phase Oxygen Generation from the Oxygen Carrier an Essential Prerequisite to Ignition?"; *Combust. Flame* 2013, 160, 432-437.
- [25] Kim, J. Y.; Rodriguez, J. A.; Hanson, J. C.; Frankel, A. I.; Lee, P. L. "Reduction of CuO and Cu<sub>2</sub>O with H<sub>2</sub>: H Embedding and Kinetic Effects in the Formation of Suboxides"; *J. Am. Chem. Soc.* 2003, 125, 10684-10692.
- [26] Hosseini, S. G.; Sheikhpour, A.; Tavangar, S.; Keshavarz, M. H. "The Influence of Magnesium Powder on the Thermal Behavior of Al-CuO Thermite Systems"; *J. Therm. Anal. Calorim.* submitted for publication.
- [27] McLain, J. H.; Lewis, D. V. "Effect of Phase Change in Solid-Solid Reactions"; Report WCDC 6465, Grant ADAMC-18-035-77(A), Chemical Research and Development Laboratories, Edgewood Arsenal, MD, 1965.
- [28] Fathollahi, M.; Pourmortazavi S. M.; Hosseini S. G. "The Effect of the Particle Size of Potassium Chlorate in Pyrotechnic Compositions"; *Combust. Flame* 2004, 138, 304-306.
- [29] Fathollahi, M.; Behnejad H. "A Comparative Study of Thermal Behaviors and Kinetics Analysis of the Pyrotechnic Compositions Containing Mg and Al"; *J. Therm. Anal. Calorim.* 2015, 120, 1483-1492.
- [30] Pourmortazavi, S. M.; Babae, S.; Shamsi Ashtiani, F. "Statistical Optimization of Microencapsulation Process for Coating of Magnesium Particles with Viton Polymer"; *Appl. Surf. Sci.* 2015, 349, 817-825.
- [31] Koch, E. C. "Metal-Fluorocarbon-Pyrolants IV: Thermochemical and Combustion Behaviour of Magnesium/Teflon/Viton (MTV)"; *Propell., Explos., Pyrotech.* 2002, 27, 340-351.
- [4] Wang, L.; Luss, D.; Martirosyan, K. S. "The Behavior of Nanothermite Reaction Based on Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al"; *J. Appl. Phys.* 2011, 110, 1-7.
- [5] Fischer, S. H.; Grubelich, M. C. "Theoretical Energy Release of Thermites, Intermetallics, and Combustible Metals"; In 24<sup>th</sup> International Pyrotechnics Seminar, Monterey, CA, USA, 1998, 1-13.
- [6] Stamatis, D.; Jiang, Z.; Hoffmann, V. K.; Schoenitz, M.; Dreizin, E. L. "Fully Dense, Aluminum-Rich Al-CuO Nanocomposite Powders for Energetic Formulations"; *Combust. Sci. Technol.* 2009, 181, 97-116.
- [7] Ilunga, K.; Del Fabbro, O.; Yapi, L.; Focke, W. W. "The Effect of Si-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the Ignition of The Al-CuO Thermite"; *Powder Tech.* 2011, 205, 97-102.
- [8] Wang, Y.; Jiang, W.; Zhang, X.; Liu, H.; Liu, Y.; Li, F. "Energy Release Characteristics of Impact Initiated Energetic Aluminum-Magnesium Mechanical Alloy Particles with Nanometer-Scale"; *Thermochim. Acta* 2011, 512, 233-239.
- [9] Wang, S. X.; Liang, K. M.; Zhang, X. H. "Influence of Heating-Rate on DTA Curve of the Aluminothermic Reaction"; *J. Mater. Sci. Lett.* 2003, 22, 855-856.
- [10] Conkling, J. A.; Mocella, C. "Chemistry of Pyrotechnics: Basic Principles and Theory"; Taylor & Francis Group, 2011.
- [11] Yan, Z. X.; Deng, J.; Luo, Z. M. "A Comparison Study of the Agglomeration Mechanism of Nano- and Micrometer Aluminum Particles"; *Mater. Charact.* 2010, 61, 198-205.
- [12] Wang, J.; Hua, A.; Persic, J. "Thermal Stability and Reaction Properties of Passivated Al/CuO Nano-Thermite"; *J. Phys. Chem. Solids* 2011, 72, 620-625.
- [13] Shen, J.; Qiao, Z.; Zhang, K.; Wang, J.; Li, R. "Effects of Nano-Ag on the Combustion Process of Al/CuO Metastable Intermolecular Composite"; *Appl. Therm. Eng.* 2014, 62, 732-737.
- [14] Eslami, A.; Hosseini, S. G.; Bazrgary, M. "Improvement of Thermal Decomposition Properties of Ammonium Perchlorate Particles using Some Polymer Coating Agents"; *J. Therm. Anal. Calorim.* 2012, 113, 721-30.
- [15] Sanders, V. E.; Asay, B. W.; Foley, T. J.; Tappan, B. C.; Pacheco, A. N.; Son, S. F. "Reaction Propagation of Four Nanoscale Energetic Composites (Al/MoO<sub>3</sub>, Al/WO<sub>3</sub>, Al/CuO and Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)"; *J. Propul. Power* 2007, 23, 707-714.
- [16] Eslami, A.; Hosseini, S. G.; Asadi, V. "The Effect of Microencapsulation with Nitrocellulose on Thermal Properties of Sodium Azide Particles"; *Prog. Org. Coat.* 2009, 65, 269-274.
- [17] Granier, J. J.; Pantoya, M. L. "Laser Ignition of Nanocomposite Thermites"; *Combust. Flame* 2004, 138, 373-383.
- [18] Suna J.; Pantoyab Michelle L.; Sincde L. "Dependence of Size and Size Distribution on Reactivity of Aluminum Nanoparticles in Reactions with Oxygen and MoO<sub>3</sub>"; *Thermochim. Acta* 2006, 444, 117-127.