فصلنامه‌ی علمی پژوهشی

علم و مهندسی سرامیک

دوره‌ی ۹، شماره‌ی ۲، تابستان ۱۳۹۹

سنتز پودر نیتریدبور به روش کربوترمال با استفاده از رزین فنولیک و کربن بلک و بررسی تاثیر افزودنی کربنات کلسیم

نوع مقاله: علمی پژوهشی

مهری مشهدی[۱*]، امیر صدری قویدل[۲]

[۱] استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، [۲] دانشجو کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران

* me_mashadi@yahoo.com

اطلاعات مقاله:

دریافت: ۶ شهریور ۱۳۹۸

پذیرش: ۱ تیر ۱۳۹۹

کلید واژه:

نیتریدبور هگزاگونال؛ سنتز پودر سرامیکی؛ احیای کربوترمال.

چکیده:

تاثیر افزودنی کربنات کلسیم بر تشکیل کربوترمال نیتریدبور هگزاگونال (h-BN) مورد بررسی قرار گرفت. مخلوط اکسیدبور و کربن بلک، و همچنین مخلوط اکسیدبور و رزین فنولیک، شامل ۲ درصد وزنی افزودنی کربنات کلسیم در دمای ۱۴۰۰ درجه سانتیگراد و به مدت ۱ساعت تحت اتمسفر نیتروژن تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند. فازهای تشکیل شده در محصولات با آنالیز الگو پراش اشعه ایکس (XRD) و میزان نتیریدبور تشکیل شده نیز با آنالیز شیمیایی مشخص شدند. اندازه ذرات و مورفولوژی پودر (h-BN) تشکیل شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد بررسی قرار گرفتند. مشخص گردید استفاده از رزین به جای کربن بلک به عنوان احیا کننده اکسیدبور، باعث افزایش میزان نیتریدبور تشکیل شده و همچنین کاهش اندازه ذرات نیتریدبور می‌شود. افزودن کربنات کلسیم نیز باعث افزایش حدودا ۲۵ درصدی مقدار نیتریدبور تشکیل شده می‌شود. اندازه ذرات میانگین با احیا کننده کربن بلک در حدود ۳۵۰-۲۰۰ نانومتر بود. و از طرفی اندازه ذرات میانگین با احیا کننده رزین در حدود ۱۷۰-۹۰ نانومتر است. در این مقاله میزان اکسیدبور نیز متغیر بود که با افزایش آن، میزان نیتریدبور تولید شده نیز افزایش می یابد و سپس تقریبا ثابت می‌ماند.

۱- مقدمه

نیترید بور ماده‌ای کاملاً مصنوعی و ساخته‌ی دست بشراست و می‌تواند در ساختارهای مختلف مانند هگزاگونال و مکعبی وجود داشته باشد. نیتریدبور هگزاگونال[۱] (h-BN) شبیه گرافیت ویژگی‌های شگفت‌انگیزی مانند روانسازی، دیرگدازی، عایق الکتریکی و پایه کاتالیستی دارد. از پودر نیتریدبور هگزاگونال در قالب ریخته گری به عنوان یک روانساز دما بالا و یا حتی در لوازم آرایشی استفاده می‌شود [۱].

[1] hexagonal

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1399.9.2.7.7]

پودرنیتریدبور هگزاگونال را می‌توان با هات پرس[1] شکل داد و به عنوان یک قالب یا بوته برای نگهداری مذاب فلزات و عایق الکتریکی استفاده کرد [۳-۲]. مصرف h-BN در دهه های اخیر به دلیل خواص منحصر به فرد آن و استفاده در مواد کامپوزیتی افزایش یافته است. این ماده باعث کاهش ضریب انبساط حرارتی و ضریب اصطکاک می‌شود و هدایت حرارتی را افزایش می‌دهد. از h-BN به دلیل بهبود شوک حرارتی و ماشین کاری به طور گسترده در کامپوزیت‌های سرامیکی استفاده می‌کنند[۵-۴].

در حال حاضر سه روش اصلی برای سنتز نیترید بور وجود دارد: پرس گرم، PIP[2] و رسوب بخار شیمیایی [۹-۶]. نیترید بور به دلیل ذات کوالانسی آن و نیاز به دمای ۱۸۰۰ درجه سانتیگراد برای زینتر و بطبع مصرف انرژی بالا سنتز سخت و گران قیمتی دارد [۸]. با PIP نیترید بور حاصل خلوص بالا و ساختار همگنی داردو در دما پایین و بدون افزودنی قابل انجام است اگرچه معایبی مانند هزینه بسیار بالا و دستگاه‌های پیچیده دارد [۷]. نیتریدبوری که با روش CVD به دست می‌آید خلوص بالا، چگالی وکیفیت بالایی دارد. اما یک مشکل اصلی در این روش فشار بخار بالا، مصرف مواد اولیه خطرناک و همچنین تولید محصولات جانبی است که در طول واکنش بر خواص محصول تاثیر می‌گذارد [۶].

در سال‌های اخیر روش احیا کربوترمال با توجه به مزایای آن توجه زیادی را به خود جلب کرده است. واکنش کربوترمیک اکسیدبور و کربن به صورت واکنش (۱) می‌باشد.

$$2BN(s)+3CO(g) \rightarrow B_2O_3(l)+3C(s)+N_2(g) \qquad (۱$$

مطالعات انجام شده بر روی سازوکار تشکیل کربوترمیک نیتریدبور هگزاگونال نشان می‌دهد که واکنش (۱) از طریق واکنش‌های میانی انجام می‌گیرد. بارتنیسکایا و همکارانش [۱۰] نتیجه گرفتند که ابتدا اکسیدبور به وسیله کربن به بور کاهش پیدا می‌کند و سپس بور با نیتروژن واکنش می‌دهد و نیتریدبور تشکیل می‌شود. آیدوق و همکارانش [۱۱] پیشنهاد کرد که تشکیل h-BN در دو مرحله اتفاق می‌افتد. در ابتدا با واکنش اکسیدبور و کربن، کاربیدبور تشکیل می‌شود و سپس در واکنش کاربیدبور، اکسیدبور و نیتروژن h-BN تشکیل می‌گردد. نقش کاربیدبور در تشکیل h-BN توسط چامرلو و همکارانش [۱۲] مورد بررسی قرار گرفت و نتیجه‌گیری شد که کاربیدبور ترکیب میانی ضروری نیست و در مناطقی تشکیل می‌شود که فشار نیتروژن پایین است.

برخی افزودنی‌ها بر تشکیل نیتریدبور هگزاگونال موثرند. بارتنیسکایا و همکارانش [۱۴-۱۳] نتیجه گرفتند افزودن Li_2CO_3 و LiOH در B_2O_3-C تحت گاز نیتروژن مقدار بلورینگی نیتریدبور هگزاگونال را زیاد می‌کند و همچنین پیشنهاد کردند که h-BN از ذوب بورات لیتیوم حاصل می‌شود. همچنین محققانی به طور جداگانه اثر افزودنی کربنات باریم و اکسید منیزیم [۱۵]، کربنات کلسیم [۱۷-۱۶]، کربنات سدیم [۱۸] و کربنات پتاسیم [۱۹] را به مخلوط B_2O_3-C تحت گاز نیتروژن مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که این افزودنی‌ها باعث افزایش اندازه ذرات نیتریدبور هگزاگونال می‌شود و همچنین مقدار h-BN تولیدشده افزایش می‌یابند و میزان کاربیدبور کاهش می‌یابد. به دلیل توسعه کاربرد h-BN، روش‌های تولید ارزان و کم دما در حال توسعه هستند.

[1] Hot Press
[2] Precursor infiltration and pyrolysis

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.23222352.1399.9.2.7.7]

هدف این مقاله سنتز و بررسی سازوکار تشکیل نیتریدبور به وسیله احیا کربوترمال اکسیدبور توسط کربن بلک و رزین فنولیک در حضور گاز نیتروژن و همچنین تاثیر افزودنی اکسید کلسیم می‌باشد.

۲- فعالیت‌های تجربی

اکسیدبور (خلوص > ٪۹۸)، کربن بلک (خلوص > ٪۹۷)، رزین فنولیک و کربنات کلسیم (خلوص > ٪۹۹) به عنوان مواد اولیه مورد استفاده قرار گرفتند. نمونه‌های مختلف مطابق جداول (۱) و (۲) طراحی گردیدند که نمونه‌های A حاوی مخلوط اکسیدبور و کربن بلک هستند، نمونه‌های B حاوی اکسیدبور، کربن بلک و افزودنی کربنات کلسیم می‌باشند. در نمونه‌های C و D به جای کربن بلک از رزین فنولیک استفاده شده است و چهار نمونه C بدون افزودنی و چهار نمونه D حاوی افزودنی کربنات کلسیم می‌باشند. اکسیدبور به دلیل تبخیر بیشتر از نسبت استوکیومتری انتخاب شد. میزان خاکستر[1] رزین فنولیک ۵۰٪ محاسبه گردید، بنابرین در محاسبه فرمولاسیون‌ها دو برابر مورد استفاده قرار گرفته‌است.

عملیات مخلوط کردن نمونه‌ها توسط آسیاب ماهواره‌ای خشک با سرعت ۲۰۰ rpm و مدت زمان ۲ ساعت صورت گرفت. بعد از آسیا داخل بوته گرافیتی قرار گرفته و درون کوره با اتمسفر کنترل تحت گاز نیتروژن با سرعت جریان‌دهی ۲۰۰ میلی لیتر بر دقیقه قرار گرفتند(خلوص گاز نیتروژن با مورد استفاده > ٪۹۹/۹۹) و تا دمای ۱۴۰۰ درجه سانتیگراد با سرعت حرارت دهی ۱۰ درجه سانتیگراد بر دقیقه تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند. بعد از سرد شدن در داخل کوره تا دمای محیط، بر روی نمونه‌ها آزمون‌های مختلف انجام گردید.

جدول ۱- ترکیب نمونه‌های A و B

نمونه	اکسید بور B_2O_3 (مول)	کربن بلک C (مول)	کربنات کلسیم $CaCO_3$ (٪وزنی)
A1	۱	۳	-
A1.5	۱/۵	۳	-
A2	۲	۳	-
A2.5	۲/۵	۳	-
B1	۱	۳	۲
B1.5	۱/۵	۳	۲
B2	۲	۳	۲
B2.5	۲/۵	۳	۲

جدول ۲- ترکیب نمونه‌های C و D

نمونه	اکسید بور B_2O_3 (مول)	رزین فنولیک (مول)	کربنات کلسیم $CaCO_3$ (٪وزنی)
C1	۱	۶	-
C1.5	۱/۵	۶	-
C2	۲	۶	-
C2.5	۲/۵	۶	-
D1	۱	۶	۲
D1.5	۱/۵	۶	۲
D2	۲	۶	۲
D2.5	۲/۵	۶	۲

[1] ash

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-06]

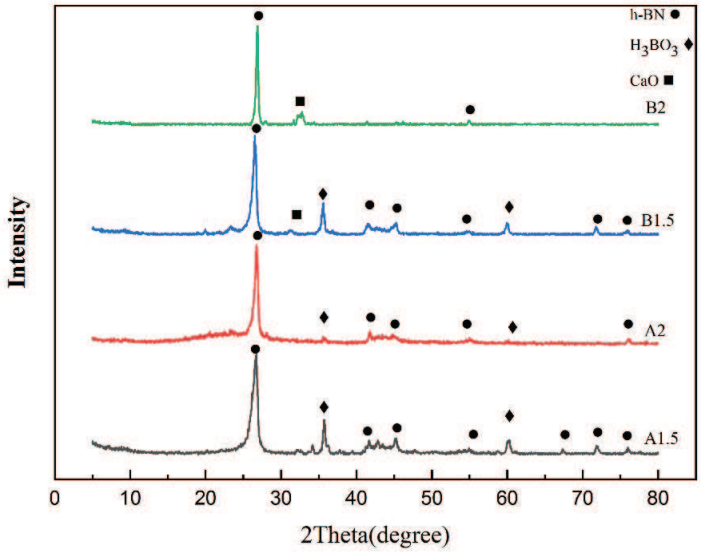
[DOR: 20.1001.1.23222352.1399.9.2.7.7]

به منظور بررسی فازهای ایجاد شده از آنالیز پراش پرتو ایکس (Bourevestnik مدل DRON-8 مجهز به تولید کننده پرتو Cu kα با طول موج ۱/۵۴ آنگستروم در بازه صفرتا ۹۰ درجه با سرعت ۰/۰۵ درجه برثانیه) و برای بررسی مورفولوژی و اندازه ذرات پودر نیتریدبور سنتز شده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (ساخت شرکت تی سکن مدل Vega/tescan) استفاده شد. برای تعیین راندمان نیترید بور هگزاگونال سنتز شده مقدار نیترید بور سنتز شده نسبت به مقدار ماده اولیه مورد استفاده سنجیده می‌شود. بدین صورت که وزن نیترید بور سنتز شده به مقدار کل مواد اولیه استفاده شده تقسیم می‌گردد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- سنتز نیتریدبور با احیا کننده کربن بلک

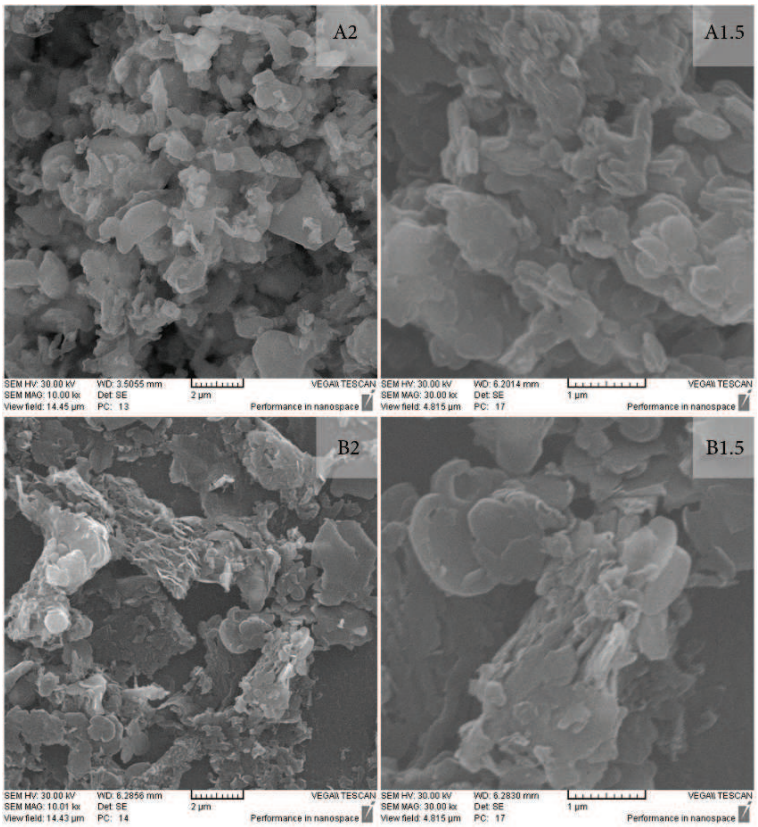
بعد از عملیات حرارتی، نمونه‌ها دچار تغییر در شکل ظاهری، رنگ و کاهش وزن می‌شوند که نشان دهنده تشکیل نیتریدبور است. نتایج آنالیزهای الگوی پراش اشعه ایکس و میکروسکوپ الکترونی روبشی حاکی از تشکیل نیتریدبور هگزاگونال در تمامی نمونه‌ها است. پیک‌های H_3BO_3 (که از طریق واکنش اکسیدبور واکنش نکرده با رطوبت هوا هنگام آماده سازی نمونه‌ها ایجاد شده است) به دلیل استفاده بیش از مقدار استوکیومتری در بعضی نمونه‌ها مشاهده می‌شود. بر اساس نتایج الگوی پراش اشعه ایکس هیچ گونه فاز دیگری در نمونه‌های عملیات حرارتی شده در ۱۴۰۰ درجه سانتیگراد وجود نداشتند. نتایج نشان می‌دهد که کربن یا در مخلوط با اکسیدبور در اتمسفر گاز نیتروژن و دمای ۱۴۰۰ درجه سانتیگراد به طور کامل مصرف می‌شود و محصول واکنش احیا، نیتریدبور است. الگوی پراش اشعه ایکس نمونه‌های A و B در شکل ۱ و همچنین تصاویر میکروسکوب روبشی الکترونی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱- الگوی پراش اشعه ایکس نمونه‌های A) بدون افزودنی و B) با افزودنی کربنات کلسیم

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1399.9.2.7.7]



شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ روبشی الکترونی نمونه‌های A) بدون افزودنی و B) با افزودنی کربنات کلسیم

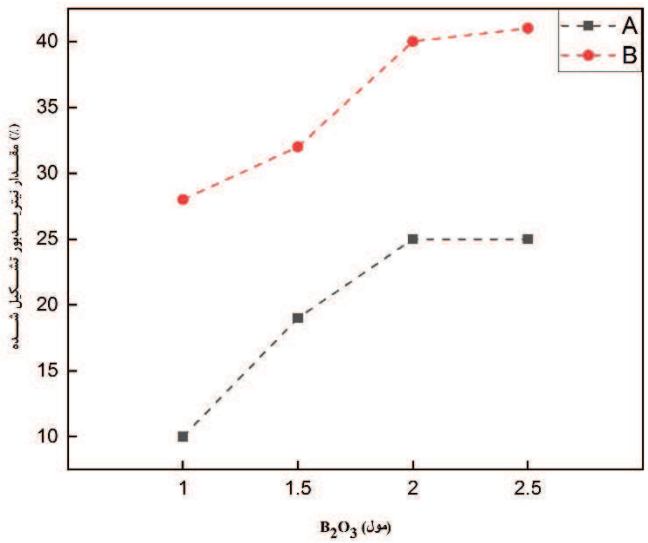
با توجه به تصاویر SEM، محصولات واکنش تشکیل شده در آزمایشات تحت شرایط دمای ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان نگه‌داری ۱ساعت، عمدتا نیتریدبور صفحه‌ای شکل هستند. همان‌طور که مشخص است افزودن کربنات کلسیم به مخلوط کربن‌بلک و اکسیدبور باعث افزایش جزئی اندازه ذرات نیتریدبور سنتز شده می‌شود.

در شکل ۳ مقدار نیتریدبور به دست آمده برحسب درصد (راندمان) نمونه‌های A و B نشان داده شده است. همان طور که مشخص است، در این نمونه‌ها با افزایش مقدار اکسیدبور، میزان نیتریدبور تولید شده برای هردو نمونه‌های دارای افزودنی کربنات کلسیم و چه بدون افزودنی افزایش می‌یابد. ولی با افزایش مقدار نیتریدبور از ۲مول به ۲/۵ مول تغییر محسوسی در مقدار نیتریدبور تولید شده ایجاد نمی‌شود که به دلیل میزان تبخیر بالای اکسیدبور می‌باشد.

در جدول (۳) اندازه بلورک نمونه‌ها با روش ویلیامسون هال بر حسب نانومتر نمونه‌های A و B نشان داده شده است. نمونه A1.5 و A2 به ترتیب اندازه بلورک ۲۰۷ و ۲۴۰ نانومتر را نشان می‌دهند، همچنین نمونه‌های B1.5 و B2 اندازه بلورک ۳۰۱ و ۳۴۴ نانومتر را دارا هستند. بدین ترتیب افزودن ۱۰ درصد وزنی کربنات کلسیم به مخلوط اکسیدبور و کربن بلک باعث افزایش اندازه بلورک پودر نیتریدبور هگزاگونال تولید شده می‌شود. (به دلیل دقت پایین این روش، این اعداد بیشتر برای مقایسه نشان داده شده است و نمی‌توان به آن‌ها استناد کرد)

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1399.9.2.7.7]



شکل ۳- مقدار نیتریدبور تشکیل شده (راندمان) نمونه‌های A) بدون افزودنی و B) با افزودنی کربنات کلسیم

جدول ۳- اندازه کرسیتالیت نمونه‌های A) بدون افزودنی و B) با افزودنی کربنات کلسیم

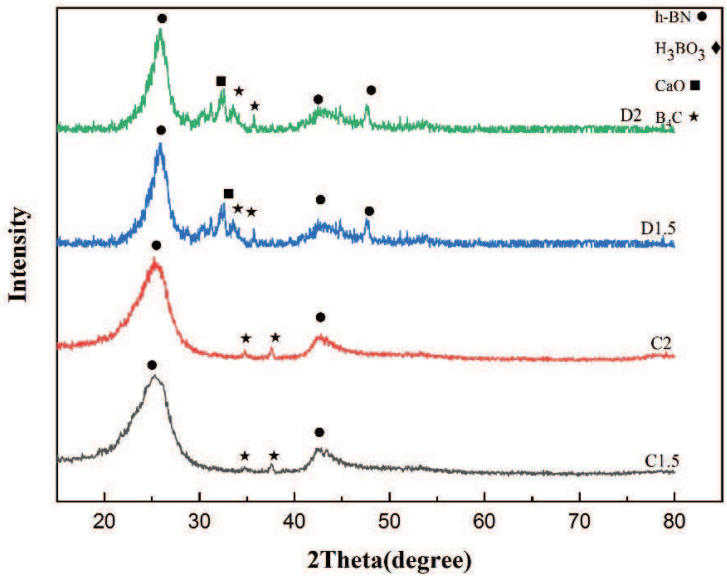
نمونه	اندازه کرسیتالیت با روش ویلیامسون هال (نانومتر)
A1.5	۲۰۷
A2	۲۴۰
B1.5	۳۰۱
B2	۳۴۴

۳-۲- سنتز نیتریدبور با احیا کننده رزین فنولیک

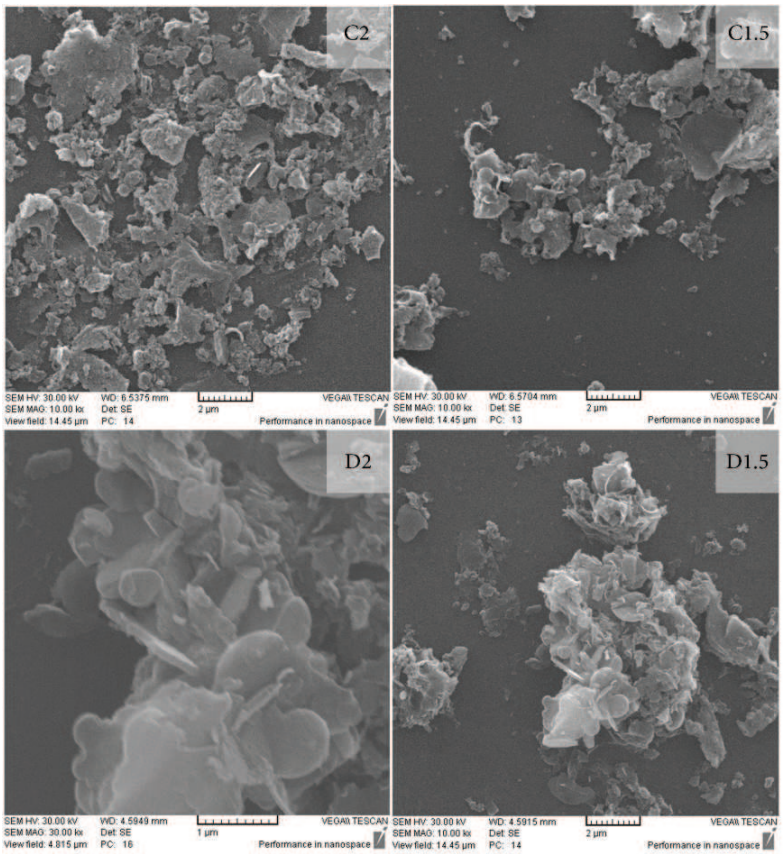
نتایج آنالیزهای الگوی پراش اشعه ایکس و میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌های حاوی اکسیدبور و رزین و دارای افزودنی کربنات کلسیم و عملیات حرارتی شده در دمای ۱۴۰۰ درجه سانتیگراد و مدت زمان نگه‌داری ۱ساعت در شکل ۴ و ۵ نشان داده شده است. با توجه به الگو پراش اشعه ایکس، در همه نمونه‌ها فاز اصلی تشکیل شده نیتریدبور هگزاگونال است و شدت پیک نیتریدبور در نمونه‌های حاوی افزودنی کربنات کلسیم نسبت به نمونه‌های بدون افزودنی کربنات کلسیم بیشتر است. مقدار بسیار ناچیزی فاز کاربیدبور در برخی نمونه‌ها مشاهده می‌شود. این فاز در مناطقی تشکیل می‌شود که میزان نفوذ نیتروژن به آن مناطق پایین باشد. در نومنه‌های حاوی افزودنی کربنات کلسیم مقدار اندکی اکسید کلسیم وجود دارد که با اسیدکلریک قابل شست وشو است.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1399.9.2.7.7]



شکل ۴- الگوی پراش اشعه ایکس نمونه‌های C) بدون افزودنی و D) با افزودنی کربنات کلسیم



شکل ۵- تصاویر میکروسکوپ روبشی الکترونی نمونه‌های C) بدون افزودنی و D) با افزودنی کربنات کلسیم

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-06]

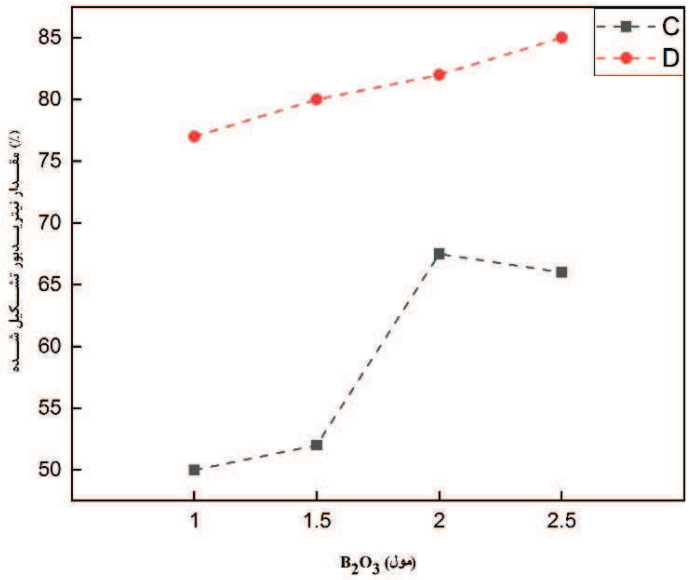
[DOR: 20.1001.1.23222352.1399.9.2.7.7]

همانطور که در تصاویر SEM شکل ۵ قایل مشاهده است، نیتریدبور سنتز شده به صورت صفحه‌ای می‌باشند. تصاویر SEM محصولات واکنش تشکیل شده در آزمایشات تحت شرایط دمای ۱۵۰۰ درجه سانتی گراد و مدت زمان نگه‌داری ۲ ساعت در شکل ۵ مشاهده می‌شود. همان‌طور که مشخص است به نظر می‌رسد ذرات نیتریدبور تشکیل شده در نمونه‌های حاوی افزودنی کربنات کلسیم مقداری بزرگ‌تر از نمونه‌های بدون افزودنی می‌باشد. ولی از نظر مورفولوژی تقریبا شبیه هم بوده و به طور واضح به صورت ذرات صفحه‌ای[1] شکل هستند.

در شکل ۶ مقدار نیتریدبور تولید شده برحسب درصد (راندمان) به صورت تابعی از مقدار اکسیدبور قابل مشاهده است. یکی از دلایل اصلی پایین بودن راندومان، میزان تبخیر بالای اکسیدبور است. از طرفی، یکی از دلایل فیزیکی دیگر می‌توان گفت که مقداری از رزین در طول فرایند از دست می‌رود بدین صورت که از طریق گاز کوره از سیستم خارج می‌شود، با افزایش دما و یا زمان، این از دست رفتن کربن افزایش پیدا می‌کند. به دلیل برخی واکنش‌های شیمیایی نیز کربن از سیستم خارج می‌شود: [۱۳]

$$2BO(g) + CO(g) \rightarrow B_2O_3(l) + 2C(s) \quad (۲$$

$$2B(g) + 3CO(g) \rightarrow B_2O_3(l) + 3C(s) \quad (۳$$



شکل ۶- مقدار نیتریدبور تشکیل شده (راندمان) نمونه‌های C) بدون افزودنی و D) با افزودنی کربنات کلسیم

[1] Plate-Like

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1399.9.2.7.7]

در جدول ۴ اندازه کرسیتالیت نمونه‌ها با روش ویلیامسون هال بر حسب نانومتر نمونه‌های C و D نشان داده شده است. نمونه C1.5 و C2 به ترتیب اندازه بلورک ۹۸ و ۱۰۳ نانومتر را نشان می‌دهند، همچنین نمونه‌های D1.5 و D2 اندازه بلورک ۱۶۱ و ۱۷۰ نانومتر را دارا هستند. بدین ترتیب افزودن ۱۰ درصد وزنی کربنات کلسیم به مخلوط اکسیدبور و کربن بلک باعث افزایش جزئی اندازه بلورک پودر نیتریدبور هگزاگونال تولید شده می‌شود.

جدول ۴- اندازه کرسیتالیت نمونه‌ای C) بدون افزودنی و D) با افزودنی کربنات کلسیم

	نمونه اندازه کرسیتالیت با روش ویلیامسون هال (نانومتر)
C1.5	۹۸
C2	۱۰۳
D1.5	۱۶۱
D2	۱۷۰

۳-۳- سازوکار واکنش

واکنش کلی تشکیل نیتریدبور از اکسیدبور،کربن یا رزین و نیتروژن به صورت زیر است:

$$2BN(s)+3CO(g) \rightarrow B_2O_3(l)+3C(s)+N_2(g) \quad (۴$$

بنابرین انتظار است واکنش از طریق واسطه‌های گازی انجام شود. تشکیل نیتریدبور از مخلوط تحت گاز نیتروژن توسط واکنش‌های متوالی شامل B_2O_3 به عنوان فاز میانی B_2O_3 گازی صورت گرفته است. تشکیل گاز B و BO ممکن است به علت واکنش B_2O_3 و C باشد. بر این اساس تشکیل BN در سیستم ممکن است از طریق فازهای میانی گازی رخ دهد. B_2O_3 در ابتدا به B کاهش می‌یابد و پس از آن B با N2 واکنش می‌دهد تا BN تشکیل شود [۱۴].

$$B(g)+\frac{1}{2}N_2(g) \rightarrow BN(s) \quad (۵$$

$$BO(g)+C(s)+\frac{1}{2}N_2(g) \rightarrow BN(s)+CO(g) \quad (۶$$

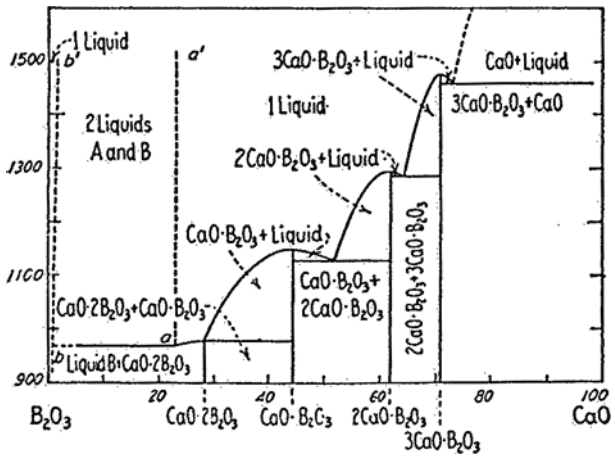
۴-۳- تاثیر افزودنی کربنات کلسیم بر تشکیل h-BN

همان طور که مشاهده شد با افزودن کربنات کلسیم با ۱۰٪ وزنی به سیستم مقدار نیترید بور تولید شده افزایش پیدا می‌کند.

سازوکاری که برای تاثیر افزودنی پیشنهاد شده است این است که از اکسید بور و اکسید کلسیم ناشی از کلسیناسیون کربنات کلسیم، طبق دیاگرام فازی B_2O_3-CaO شکل ۷، مذاب بورات کلسیم تشکیل می‌شود و گاز نیتروژن درون این مذاب حل شده و از طریق واکنش با بورات موجود در مذاب، نیترید بور حاصل می‌شود که به سازوکار یونی معروف است. بورات کلسیم در اسید شویی با HCl از سیستم خارج می‌گردد. به طور کلی این افزودنی باعث افزایش تشکیل نیترید بور و اندازه ذرات نیترید بور قابل مشاهده در شکل ۳ و ۶ و جدول ۴ و ۷ می‌شود.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1399.9.2.7.7]



شکل۷- دیاگرام فازی B_2O_3-CaO [۲۰]

۴- نتیجه‌گیری

با عملیات حرارتی مخلوط اکسیدبور و کربن بلک یا رزین با افزودنی کربنات کلسیم و یا بدون افزودنی، تحت شرایط دمای ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان نگه‌داری ۲ساعت، محصولات واکنش عمدتا نیتریدبور صفحه‌ای شکل هستند.

افزودن کربنات کلسیم به مخلوط اکسیدبور و کربن بلک یا رزین فنولیک به طور قابل توجهی مقدار نیتریدبور سنتز شده را افزایش و اندازه ذرات را به صورت جزئی افزایش می‌دهد. در مقاسیه دو نوع احیا کننده مورد استفاده، رزین فنولیک برای احیا اکسیدبور موثرتر از کربن بلک عمل می‌کند و میزان نیتریدبور سنتز شده را افزایش می‌دهد.

با افزایش مقدار اکسیدبور، میزان نیتریدبور تولید شده برای هردو نمونه‌های دارای افزودنی کربنات کلسیم و چه بدون افزودنی افزایش می‌یابد. ولی با افزایش مقدار نیتریدبور از ۲مول به ۲/۵ مول تغییر محوسوسی در مقدار نیتریدبور تولید شده ایجاد نمی‌شود که به دلیل میزان تبخیر بالای اکسیدبور می‌باشد.

مراجع

[1] Paine, Robert T., and Chaitanya K. Narula. "Synthetic routes to boron nitride." Chemical Reviews 90, no. 1 (1990): 73-91.

[2] Haubner, Roland, Matthias Wilhelm, Ronald Weissenbacher, and Benno Lux. "Boron nitrides—properties, synthesis and applications." In High Performance Non-Oxide Ceramics II, pp. 1-45. Springer, Berlin, Heidelberg, 2002.

[3] Kempfer, Lisa. "The many faces of boron nitride." Materials Engineering (Cleveland) (USA) 107, no. 11 (1990): 41-44.

[4] Yuan, Bo, Ji-Xuan Liu, Guo-Jun Zhang, Yan-Mei Kan, and Pei-Ling Wang. "Silicon nitride/boron nitride ceramic composites fabricated by reactive pressureless sintering." Ceramics International 35, no. 6 (2009): 2155-2159.

[5] Zhang, Guo-Jun, Jian-Feng Yang, Motohide Ando, and Tatsuki Ohji. "Nonoxide–boron nitride composites: in situ synthesis, microstructure and properties." Journal of the European Ceramic Society 22, no. 14-15 (2002): 2551-2554.

[6] Lii D F, Huang J L, Tsui L J, et al. Formation of BN Films on Carbon Fibers

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1399.9.2.7.7]

by Dip-coating[J]. Surf Coat. Technol., 2002, 150: 269-276.
[7] Li, B., C. R. Zhang, F. Cao, S. Q. Wang, Y. B. Cao, J. Feng, and J. S. Li. "Preparation of three-dimensional carbon fibre reinforced BN–Si3N4 matrix composites by precursor infiltration and pyrolysis." Materials Technology 22, no. 3 (2007): 153-155.
[8] Rusanova, Lydia Nikolaevna, Alexander Gavrilovia Romashin, Lydia Ivanovna Gorchakova, Galina Ivanovna Kulikova, and Michael Kirillovia Alexeev. "Boron nitride." U.S. Patent 5,849,242, issued December 15, 1998.
[9] Li, Bin, C. R. Zhang, Feng Cao, S. Q. Wang, Y. B. Cao, Jian Feng, and Bang Chen. "Fabrication of high density three-dimensional carbon fibre reinforced nitride composites by precursor infiltration and pyrolysis." Advances in Applied Ceramics 107, no. 1 (2008): 1-3.
[10] Kluge-Weiss, Petra, and Jens Gobrecht. "Directly Bonded Copper Metallization of AℓN Substrates for Power Hybrids." MRS Online Proceedings Library Archive 40 (1984).
[11] Aydoğdu, A., and N. Sevinç. "Carbothermic formation of boron nitride." Journal of the European Ceramic Society 23, no. 16 (2003): 3153-3161.
[12] Çamurlu, H. E., N. Sevinç, and Y. Topkaya. "Role of boron carbide in carbothermic formation of hexagonal boron nitride." Journal of materials science 41, no. 15 (2006): 4921-4927.
[13] Bartnitskaya, T. S., G. S. Oleinik, A. V. Pokropivnyi, and V. V. Pokropivnyi. "Synthesis, structure, and formation mechanism of boron nitride nanotubes." Jetp Letters 69, no. 2 (1999): 163-168.
[14] Kurdyumov, A. V., T. S. Bartnitskaya, V. I. Lyashenko, V. F. Britun, T. R. Balan, S. N. Gromyko, A. I. Danilenko, and V. B. Zelyavskii. "Structure formation patterns in carbamide synthesis of nanocrystalline graphite-like boron nitride." Powder Metallurgy and Metal Ceramics 44, no. 11-12 (2005): 590-597.
[15] Çamurlu, Hasan Erdem, Yavuz Topkaya, and Naci Sevinç. "Catalytic effect of alkaline earth oxides on carbothermic formation of hexagonal boron nitride." Ceramics International 35, no. 6 (2009): 2271-2275.
[16] Ozkenter, Ali Arda, Hasan Erdem Çamurlu, and Naci Sevinc. "EFFECTS AND ROLES OF CaCO 3 AND CaO IN THE CARBOTHERMIC FORMATION OF h-BN." Journal of Ceramic Processing Research 13.5 (2012): 533-540.
[17] Çamurlu, Hasan Erdem, Naci Sevinç, and Yavuz Topkaya. "Effect of calcium carbonate addition on carbothermic formation of hexagonal boron nitride." Journal of the European Ceramic Society 28.3 (2008): 679-689.
[18] Camurlu, Hasan Erdem. "Effect of Na2CO3 on hexagonal boron nitride prepared from urea and boric acid." Ceramics International 37, no. 6 (2011): 1993-1999.
[19] Çamurlu, H. Erdem, et al. "Catalytic effect of potassium carbonate on carbothermic production of hexagonal boron nitride." Ceramics International 39.8 (2013): 8589-8595.
[20] E. M. Levin, C. R. Robbins, H. F. McMurdie "Phase Diagrams for Ceramists" The American Ceramic Society, Ohio (1964).

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1399.9.2.7.7]