

Investigation of the Effect of Reinforcement on Thermo-Physical Properties of Ablative Heat Shields

Y. Ghaderi-Dehkordi^{1*}

Organization Research Institute

*Nobonyad Square, Tehran, IRAN

ughaderi@yahoo.com

In the present study, in order to choose the suitable heat shields a comprehensive investigation was performed. Therefore, different properties of each type of heat shields including ablative and thermo-physical properties were measured separately. Finally, the obtained properties were compared. The studied heat shields are phenolic resin composite reinforced by ceramic, asbestos AAA and C cloths. The experimental investigations consist of oxyacetylene standard flame test, specific heat capacity, thermal analysis and thermal conductivity. In addition, in order to compare the thermal efficiency of mentioned heat shields, the temperature on the back surface of each sample subjected to constant heat flux was measured. The results showed that the specimen with 8 mm thickness reinforced with ceramic cloth, which was subjected to 2500 kW.m^{-2} , reduced the temperature from 1550 to 100°C . Therefore, the phenolic composite containing ceramic cloth is the best option.

Keywords: ablative, thermo-physical, phenolic, Asbestos AAA and C, Ceramic

بررسی اثر نوع تقویت کننده بر خواص حرارتی عایق‌های فداشونده

یوسف قادری دهکردی^{*۱}

مرکز تحقیقات سازمان صنایع هوافضا

*تهران، م. نوبنیاد

ughaderi@yahoo.com

در این مقاله به منظور انتخاب یک عایق مناسب از بین چند گزینه موجود مطالعات و بررسی‌های آزمایشگاهی گسترده‌ای صورت گرفته است. بدین منظور خواص و پارامترهای اصلی مشخصه عملکرد هر عایق با آزمایش اندازه‌گیری و در نهایت مقایسه شده‌اند. ویژگی‌های اندازه‌گیری شده شامل خاصیت فداشوندگی و خواص گرمایی- فیزیکی است. عایق‌های مورد بررسی کامپوزیت‌های فنولی (رزول) تقویت شده با سه نوع الیاف مختلف شامل الیاف آزیست AAA، C و سرامیکی هستند. آزمون‌های انجام شده در این پژوهش شامل تست شعله اکسی استیلن، آزمون اندازه‌گیری ظرفیت حرارتی ویژه، آزمون اندازه‌گیری درجه حرارت در ضخامت عایق، آزمون رفتار تخریب حرارتی و گرمای فداشدن است. همچنین به منظور مقایسه عملکرد حرارتی کامپوزیت‌های مذکور، تست تعیین توزیع دمای پشت نمونه‌ها تحت شار حرارتی یکسان نیز انجام گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که عایق با ضخامت ۸ میلی‌متر، تهیه شده با الیاف سرامیکی با کاهش دما از ۱۵۵۰ به کمتر از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در شار حرارتی 2500 kW.m^{-2} بهترین گزینه برای استفاده است.

واژه‌های کلیدی: فداشوندگی، خواص گرمایی، فیزیکی، فنولی، آزیست AAA و C، سرامیک

مقدمه

پرداخته است. در این تحقیقات مشخص شد که وجود نانوذرات رس منجر به بهبود کارایی این مواد شده است و مشخص شد که در حین فرسایش کامپوزیت یک لایه سرامیکی غیرآلی تشکیل شده است که لایه عایق حرارتی را ایجاد می‌کند تا از عایق اولیه محافظت کند. همچنین در این مقالات فرسایش این کامپوزیت‌ها نیز مدل شده است. مرجع [۱۰] نیز دو نوع الیاف کوتاه آرامید و پلی‌سولفونامید را که تقویت کننده یک عایق حرارتی است مقایسه کرده است. در این تحقیق مشخص شد، پیک حرارتی فرسایش در کامپوزیت تقویت شده با پلی‌سولفونامید ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد بیشتر است. همچنین از لحاظ مکانیکی نیز در این کامپوزیت فصل مشترک قوی‌تری بین ماتریس و الیاف وجود دارد که منجر به خواص مکانیکی بیشتری می‌شود. مرجع [۱۱] اثر نوع ماده و زبری سطح بر خواص عایق‌های حرارتی تحت

کامپوزیت‌ها در سال‌های اخیر به شدت مورد استفاده قرار گرفته‌اند. استحکام بالا و وزن کم از جمله ویژگی‌های این مواد است. یکی از قسمت‌هایی که در آن توجه زیادی به این مواد می‌شود؛ صنایع هوافضایی است. به‌ویژه در قسمت‌هایی که دمای بسیار بالا از جمله ویژگی‌های محیطی است. نحوه طراحی و بررسی رفتار مواد فداشونده با استفاده از مواد مختلف همواره مورد توجه بوده است [۱-۵]. مراجع [۶ و ۷] به بررسی اثر پارامترهای مختلف آزمایشگاهی بر خواص حرارتی فنول نوع رزول با وجود نانوذرات رس و مراجع [۸ و ۹] نیز خواص حرارتی فنول تقویت شده با آزیست و نانوذرات رس

جدول ۲- خواص الیاف مورد استفاده

خواص	واحد	آزبست AAA (A3)	آزبست A	C آزبست	سرامیک
چگالی	(Kg m ⁻³)	۲۰۰۰	۲۱۰۰	۲۱۰۰	۲۸۵۰
ضریب هدایت حرارتی	(J m ⁻¹ s ⁻¹ K ⁻¹)	۰/۶۵	۰/۸۲	۰/۷۵	۰/۶
گرمای ویژه	(J Kg ⁻¹ K ⁻¹)	۷۸۷	۶۵۰	۷۰۰	۱۰۵۰
ضخامت	(mm)	۲	۲	۲	۲

روش پخت نمونه‌ها

نمونه‌های ساخته شده در این مقاله جهت آزمایش به صورت چهار لایه به ضخامت ۸ میلی‌متر است. همچنین میزان الیاف ۵۰ درصد وزنی در نظر گرفته شد. به منظور ساخت نمونه‌ها، ابتدا الیاف با رزین آغشته می‌شوند که به آن پیش‌آغشته می‌گویند. به منظور آماده‌کردن پیش‌آغشته، تقویت‌کننده به مدت ۱۲ ساعت در داخل رزین به صورت شناور قرار می‌گیرد سپس به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد پخت می‌شود. مکانیزم مورد استفاده برای پخت نمونه‌ها در شکل (۱) نشان داده شده است. در این فرآیند به جای اعمال فشار با پرس یا هر نوع فشار مکانیکی دیگر بر روی قالب یا نمونه از فشار ناشی از خلأ و هوای داخل محفظه اتوکلاو روی کیسه‌ای که نمونه داخل آن قرار دارد استفاده شده است. در ادامه فرآیند پخت، پیش‌آغشته که معمولاً قبلاً پخته شده است روی سطح صفحه فلزی قرار داده شده است. روی پیش‌آغشته لایه جداکننده تفلونی که نجسب و مقاوم به دماست قرار گرفته است. لایه جداکننده تفلونی سوراخ یا روزنه‌هایی دارد تا در حین اعمال فشار و همچنین شرایط پخت در دمای بالا، رزین اضافی و گازهای فرار تولید شده ناشی از تبخیر مواد و واکنش‌ها بتوانند از آن خارج شوند. برای ایجاد مسیر خروج مواد ذکر شده، همچنین جذب رزین اضافی از لایه‌های متخلخل، لایه تنفس^۴ و لایه جذب‌کننده^۵ مانند پارچه شیشه یا نمدهای صنعتی استفاده شده است. همچنین در زیر پورت یا شیر خلأ نیز یک یا چند لایه پارچه الیاف شیشه به‌عنوان لایه تنفس قرار داده شده است. بین لایه‌های مذکور، فیلم جداکننده‌ای از جنس تفلون به‌عنوان مانع قرار می‌گیرد تا از نفوذ و جذب رزین به لایه تنفس جلوگیری کند. آغشته‌شدن لایه تنفس به رزین باعث بسته‌شدن مسیر خروجی و همچنین عدم اعمال فشار یکنواخت بر قطعه می‌شود. لایه تنفس اجازه می‌دهد که هوا و گازهای تولید شده

شرایط اکسیدشدن و تبخیر را بررسی کرده است. در این تحقیق، اثر این پارامترها به صورت کلاسه‌بندی ارائه شده است. در نهایت یک مدل برای مواد ناهمگن ارائه شده است که نشان می‌دهد مشخصات ساختاری کاملاً توسط فعل و انفعال بین اجزای مختلف دیکته می‌شود.

مرجع [۱۲] نیز به بررسی اثر نسبت الیاف و طول الیاف کربن بر خواص حرارتی کامپوزیت پایه فنولی پرداخته است. همچنین فرایند قالب‌گیری بهینه برای دستیابی به بهترین خواص مکانیکی و حرارتی نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. در این فرایند به بررسی اثر زمان پخت، میزان فشار و دمای پخت پرداخته شده است.

در این مقاله، هدف انتخاب یک عایق مناسب از بین چند گزینه موجود است. بدین منظور آزمایش‌های بسیار زیادی انجام شده است تا خواص و پارامترهای اصلی مشخصه عملکرد هر عایق با آزمایش اندازه‌گیری و در نهایت مقایسه شود. ویژگی‌های اندازه‌گیری شده شامل خاصیت فداشوندگی و خواص گرمایی- فیزیکی است. عایق‌های مورد بررسی کامپوزیت‌های فنولی (رزول) تقویت شده با سه نوع الیاف مختلف شامل الیاف آزبست AAA، C و سرامیکی هستند. آزمون‌های انجام شده در این پژوهش شامل: تست شعله اکسی‌استیلن (مطابق با استاندارد ASTM-E0285-80)، آزمون اندازه‌گیری ظرفیت حرارتی ویژه^۲، آزمون اندازه‌گیری درجه حرارت در ضخامت عایق، آزمون رفتار تخریب حرارتی^۳ و گرمای فداشدن است. به منظور مقایسه عملکرد حرارتی کامپوزیت‌های مذکور، تست تعیین توزیع دمای پشت نمونه‌ها تحت شار حرارتی یکسان نیز انجام گرفت.

انجام آزمایش

مواد مورد استفاده

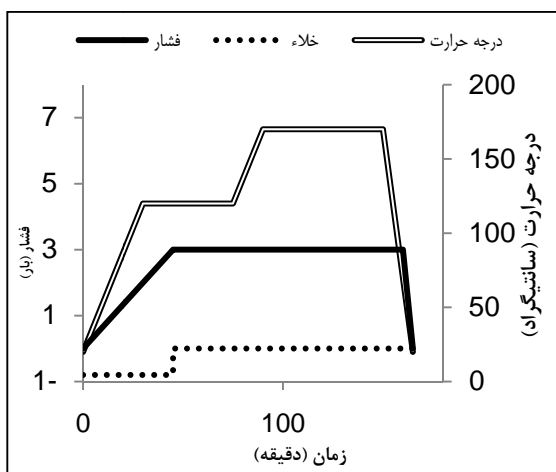
در این مقاله از رزین فنولی نوع رزول (IL800/2) استفاده شده است. مشخصات این رزین در جدول (۱) آورده شده است. به منظور تقویت رزین نیز از سه نوع الیاف به صورت جداگانه شامل: الیاف سرامیک، آزبست نوع AAA و نوع C استفاده شده است. خواص این الیاف‌ها در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۱- خواص رزین فنولی نوع رزول

خواص	مقدار
چگالی	۱۰۵۰ (Kg m ⁻³)
ضریب هدایت حرارتی	۰/۳۵ (J m ⁻¹ s ⁻¹ K ⁻¹)
گرمای ویژه	۲۰۰۰ (J Kg ⁻¹ K ⁻¹)
گرانروی در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد	۶/۵-۵/۵ (Pa.s)

4. Breather layer
5. Absorber layer

2. Differential Scanning Calorimeter
3. Thermogravimetric Analysis



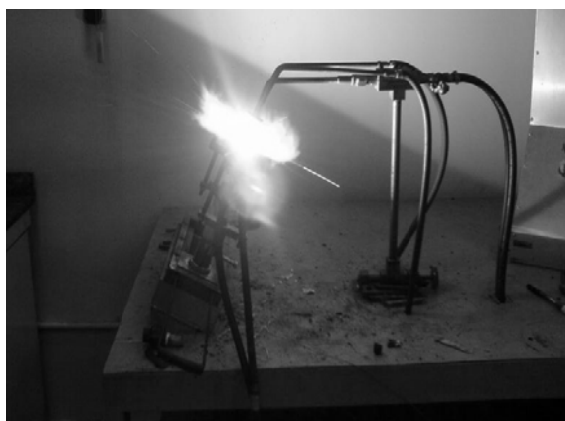
شکل ۲- چرخه پخت نمونه‌ها در اتوکلاو

اندازه‌گیری ظرفیت حرارتی ویژه

ظرفیت حرارتی ویژه با استفاده از کالری متر تفاضلی روبشی^۶ (DSC) و مطابق استاندارد ASTM D-1269 و با استفاده از دستگاه STA Polymer Laboratories 625 در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران اندازه‌گیری شده است. نرخ حرارت‌دهی در این آزمایش برابر ۱۰ کلوین بر دقیقه است.

آزمون شعله اکسی استیلن

این آزمون برای ارزیابی رفتار حرارتی و کارایی فداشوندگی عایق‌های فداشونده کامپوزیتی بر اساس استاندارد ASTM-E-285-80 انجام شد. با استفاده از این آزمون می‌توان گاز داغ با درجه حرارت ۳۰۰۰ کلوین و شار حرارتی ۸۰۰۰ kW/m.K ایجاد کرد. گازهای احتراقی به‌طور مستقیم به سطح قطعه اعمال می‌شود. شکل (۳) نمایی از تجهیزات این آزمون نشان داده شده است.



شکل ۳- نمایی از اجزای آزمون شعله اکسی استیلن

به سمت شیر خلأ جریان یابد و خلأ یکنواخت بین کیسه و قطعه برقرار شود. همچنین از ورق فلزی برای ایجاد سطح صاف و اعمال یکنواخت فشار بر سطح کامپوزیت استفاده شده است. در نهایت کیسه خلأ روی مجموعه قرار گرفته، لبه‌های کیسه با استفاده از خمیر لاستیکی آببندی محکم بر روی قالب فلزی آببند شده، مجموعه در اتوکلاو قرار گرفته است.

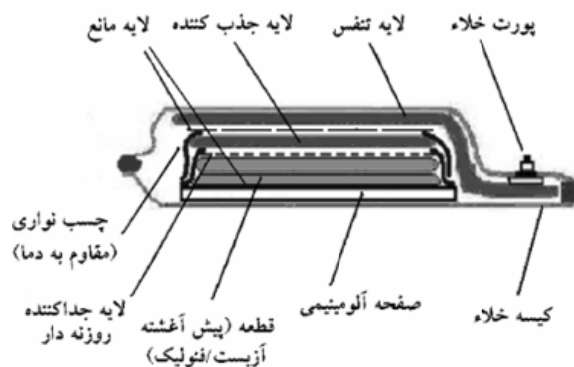
رزین فنلیک، نوع رزول رزینی تراکمی است که معمولاً به مدت زمان طولانی برای پخت نیاز دارد. واکنش‌های پخت در این رزین از دمای ۱۳۰-۱۲۰ درجه سانتی‌گراد شروع می‌شود و با افزایش دما سرعت پخت افزایش می‌یابد. دمای پخت بهینه در حدود ۱۸۰-۱۶۰ درجه سانتی‌گراد است. رزین فنولیک مواد فرار زیادی دارد و بر اثر پخت نیز مواد جانبی به مقدار زیاد تولید می‌شود به‌طوری‌که پخت سریع این رزین در فشار کم باعث ایجاد ساختاری متخلخل و فوم‌گونه می‌شود. برای اینکه مواد فرار و جانبی به آهستگی آزاد و تخییر شوند، افزایش دما در چرخه پخت باید آرام و مرحله‌ای باشد و فشار کافی در مراحل مختلف پخت بر قطعه اعمال شود. در شکل (۲) چرخه پخت نمونه‌های آزمایش در اتوکلاو ارائه شده است. تغییرات گرانشی در این منحنی به صورت نظری پیش‌بینی شده است.

تجهیزات و روش انجام آزمایش

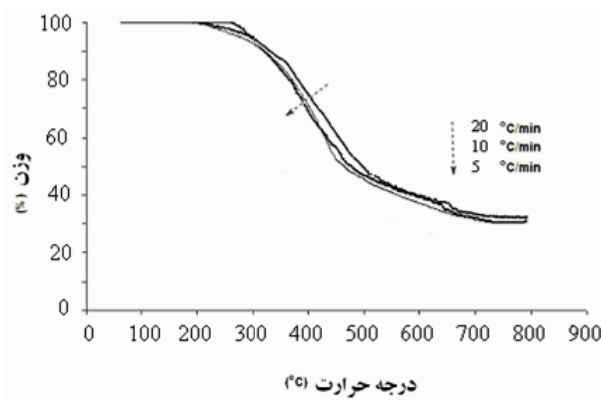
آزمون‌های تعیین خواص و مشخصات انجام شده در این تحقیق شامل موارد ذیل است:

آنالیزهای حرارتی

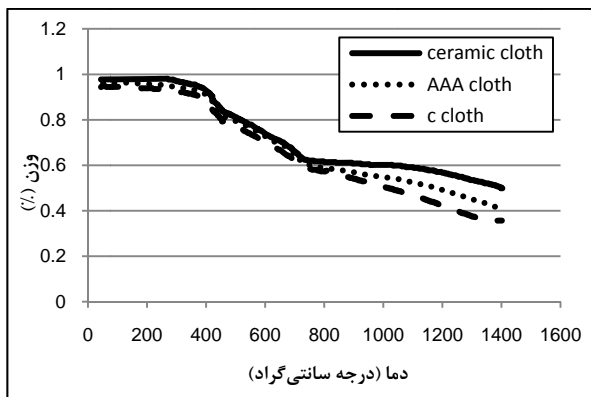
آزمون‌های تحلیل حرارتی به‌منظور ارزیابی پایداری حرارتی و تعیین پارامترهای سینتیکی تخریب حرارتی با استفاده از دستگاه STA Polymer Laboratories 625 انجام گرفته است. آزمایش‌های دینامیکی در سه نرخ حرارتی متفاوت شامل ۵، ۱۰ و ۲۰ کلوین بر دقیقه انجام شد.



شکل ۴- قالب‌گیری به کمک کیسه خلأ



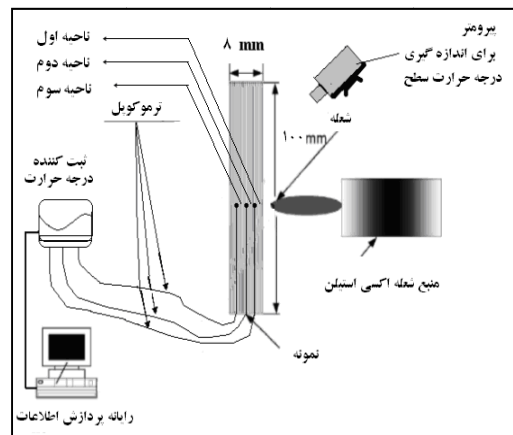
شکل ۶- منحنی TGA رزین فنولیک پخت شده در محیط نیتروژن



شکل ۷- نتایج آزمون TGA نمونه‌های کامپوزیت تقویت شده با سه نوع پارچه مورد بررسی در محیط هوا و در نرخ حرارت‌دهی ۱۰ °C/min

همان‌طور که ملاحظه می‌کنید، کامپوزیت تقویت شده با هر سه نوع الیاف تا دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد رفتار مشابهی نسبت به یکدیگر دارند. بعد از این دما، کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف سرامیکی کم‌ترین میزان افت وزن یعنی حدود ۵۰ درصد را دارد و پس از آن کامپوزیت‌های تقویت شده با آزیست نوع AAA با ۶۱ درصد کاهش وزن و در نهایت کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف آزیست نوع C با ۶۷ درصد کاهش وزن بیشترین میزان افت وزن را دارند.

در شکل (۸) منحنی‌های ظرفیت حرارتی ویژه با استفاده از کالری متر تفاضلی روبشی آورده شده است. در این منحنی‌ها مساحت زیر منحنی بیانگر گرمای فداشدن است. بنابراین گرمای فداشدن نمونه‌ها کامپوزیت رزول با تقویت‌کننده‌های آزیست نوع AAA، C و پارچه سرامیک به ترتیب معادل ۹۵۲، ۸۹۲ و ۹۶۱ kJ/kg است. بنابراین کامپوزیت تقویت شده با الیاف سرامیکی بیشترین مقدار گرمای فداشوندگی را دارد.



شکل ۴- نمایی از اجزای آزمون شعله اکسی استیلن (ادامه)

تعیین دمای پشت عایق

به منظور ارزیابی انتقال دمای عایق، آنها تحت تأثیر دو شار حرارتی متفاوت 2500 kW.m^{-2} و 7000 kW.m^{-2} قرار داده شدند و دمای پشت عایق اندازه‌گیری شد. نمونه‌های آماده شده برای تست در شکل (۴) نشان داده شده است.



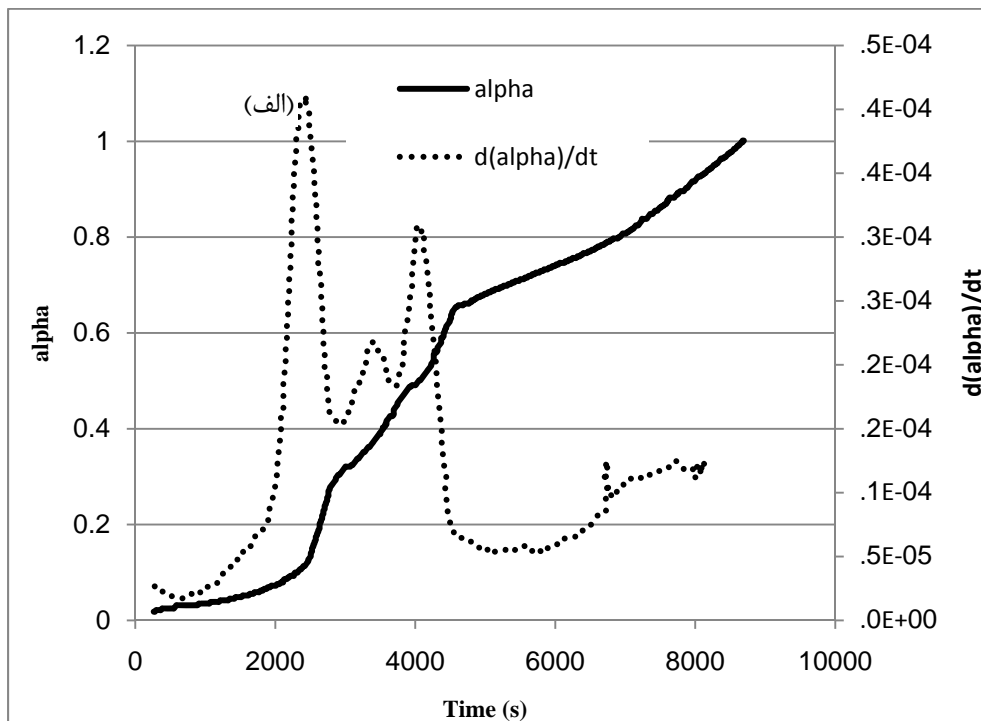
شکل ۵- نمونه‌های کامپوزیت عایق حرارتی ساخته شده برای تست تعیین توزیع دمای پشت عایق‌ها تحت شار حرارتی یکسان پس از اتصال ترموکوپل به آنها

نتایج آزمایش

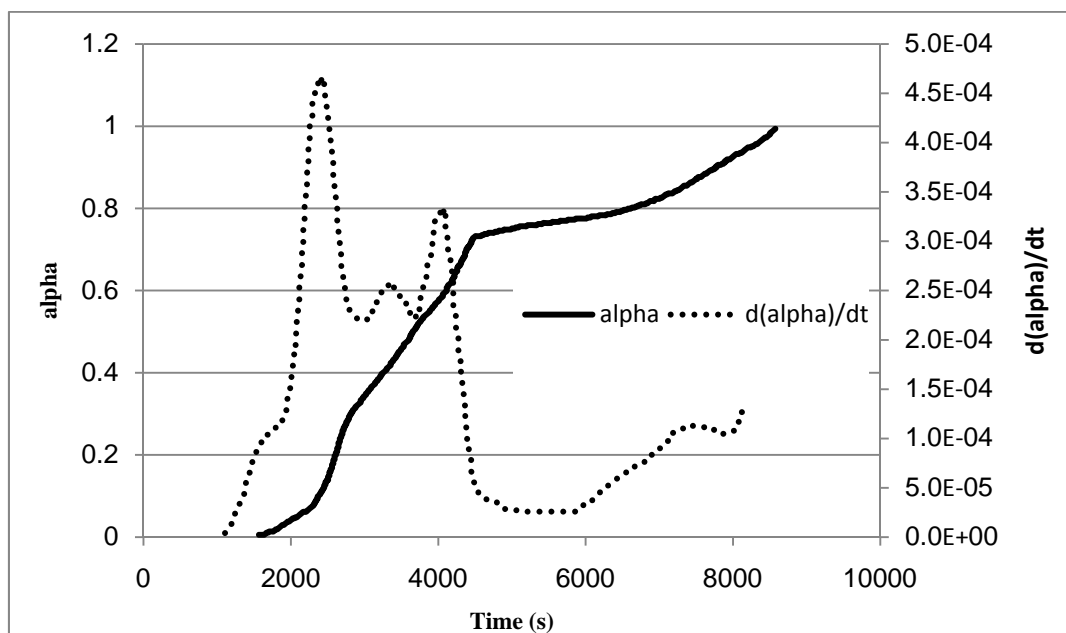
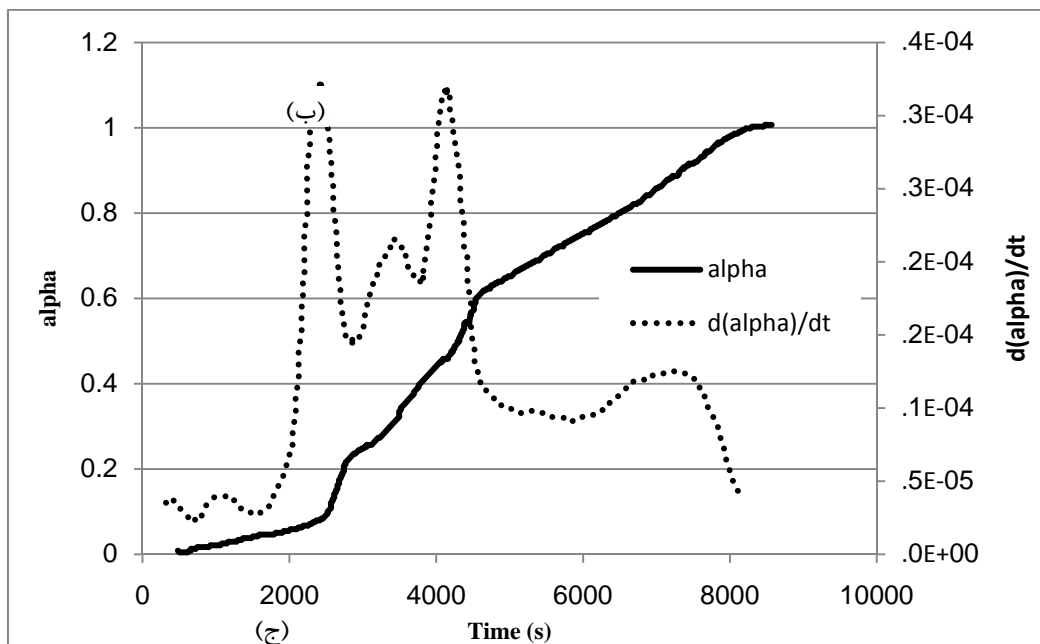
در شکل (۶) منحنی TGA^v رزین فنولیک پخته شده در محیط نیتروژن و در سه نرخ حرارت‌دهی ۵ °C/min، ۱۰ و ۲۰ نشان داده شده است. این منحنی نشان می‌دهد که تخریب حرارتی رزین فنولیک در محیط نیتروژن از دمای حدود ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد شروع شده، در دمای حدود ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد بیشترین سرعت را دارد. همچنین باقیمانده ذغال رزین مذکور در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد ۳۰ درصد است. همچنین مشخص است که رفتار رزین چندان به نرخ حرارت‌دهی وابسته نیست. در شکل (۷) نتایج آزمون TGA نمونه‌های کامپوزیت تقویت شده با سه نوع پارچه مورد بررسی در محیط هوا و در نرخ حرارت‌دهی ۱۰ °C/min نشان داده شده است. این شکل درصد افت وزن با افزایش درجه حرارت را نشان می‌دهد.



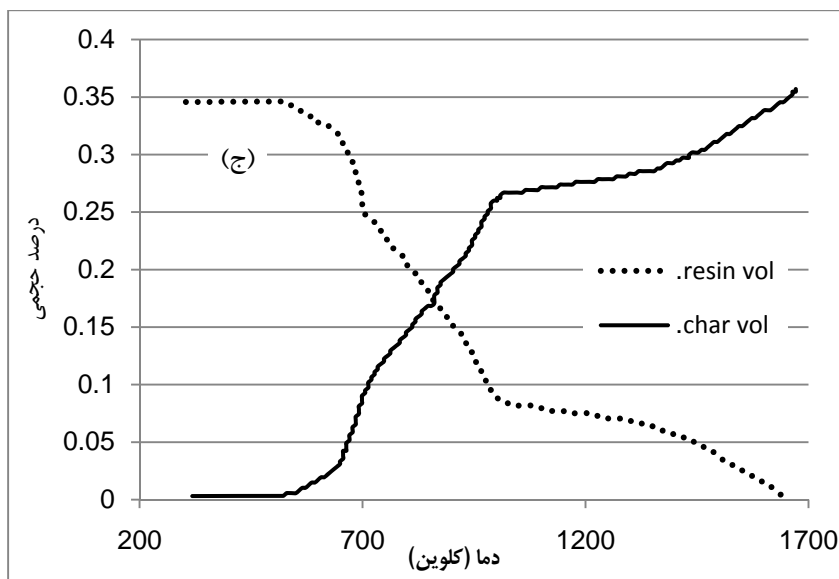
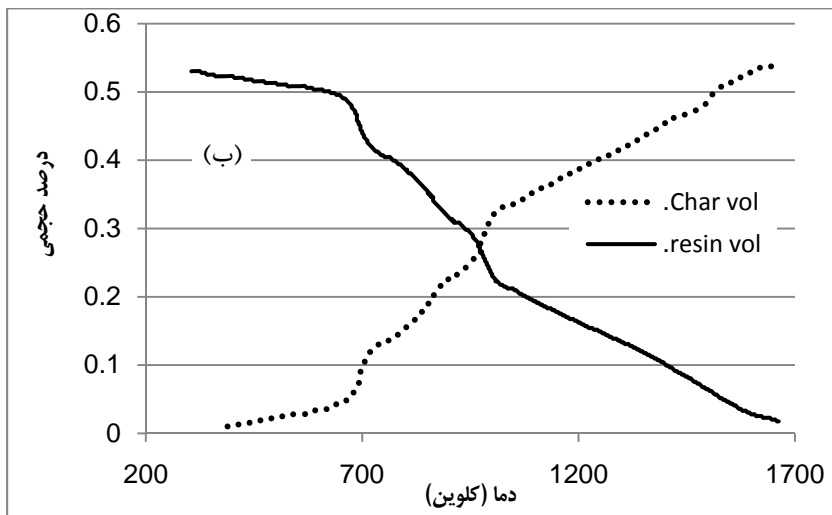
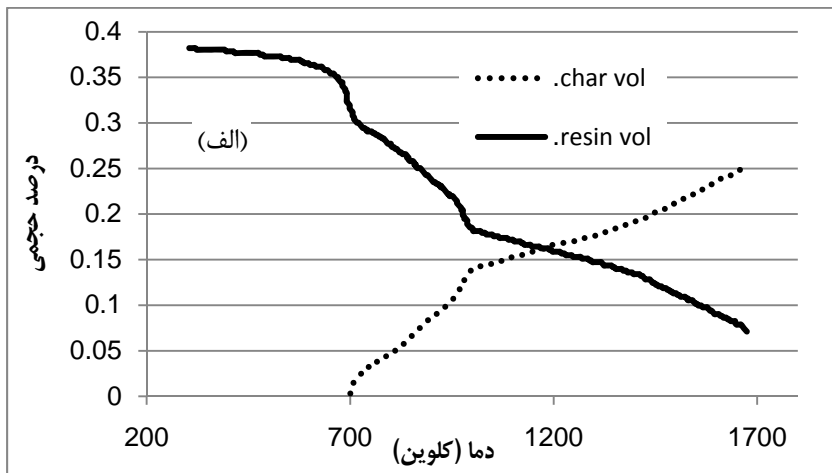
شکل ۸- منحنی‌های ظرفیت حرارتی ویژه قطعات کامپوزیتی



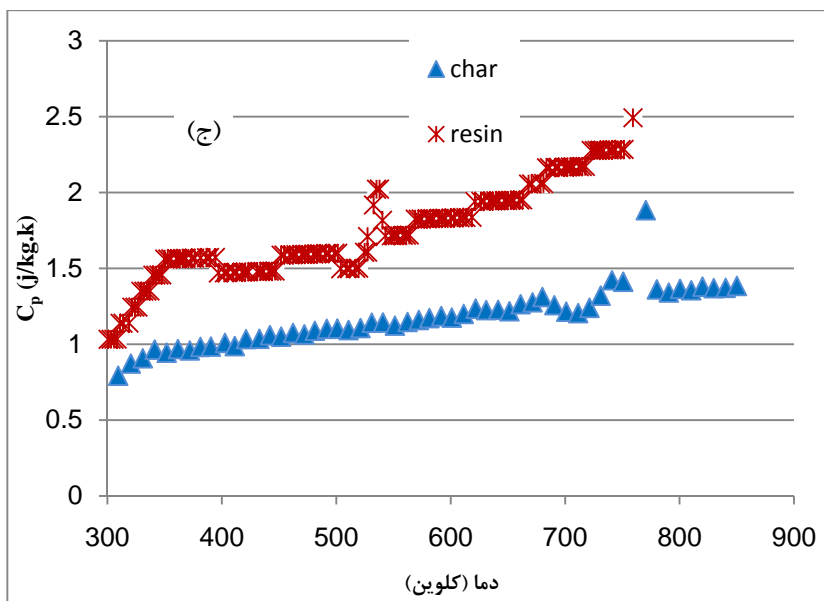
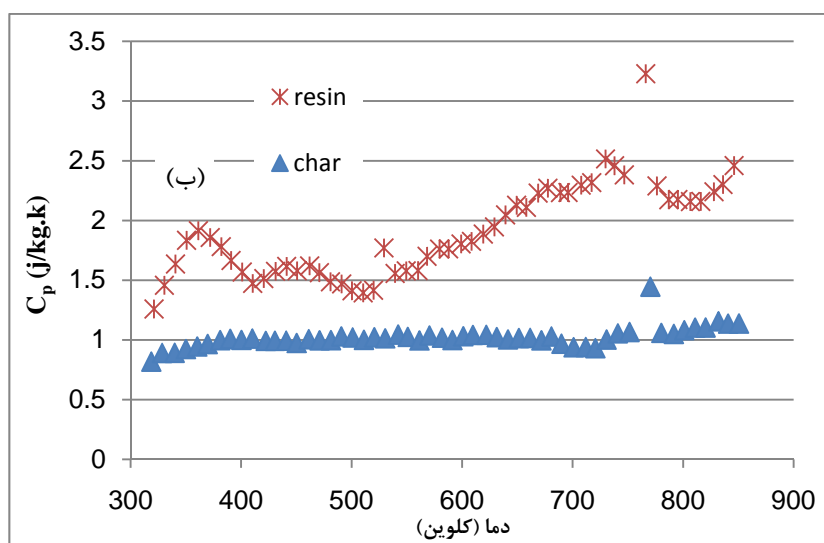
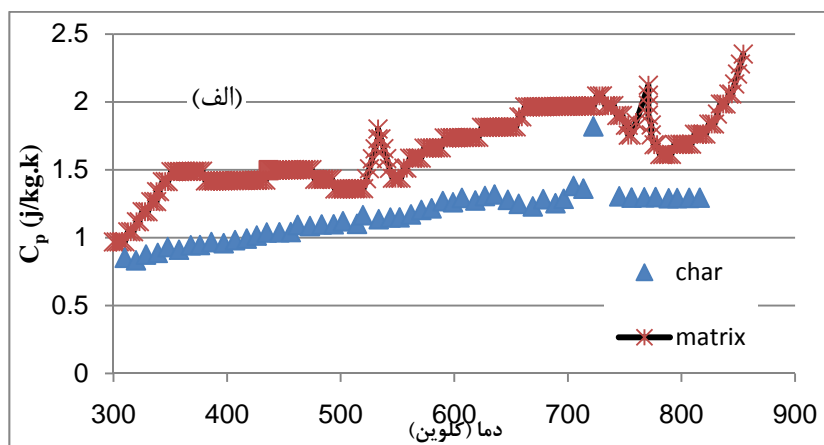
شکل ۹- نتایج آزمون آنالیز حرارتی تفاضلی روی نمونه کامپوزیت تقویت شده با الف) پارچه آزیست AAA (ب) آزیست C (ج) پارچه سرامیکی (آلفا درجه تخریب حرارتی است)



شکل ۱۰ - نتایج آزمون آنالیز حرارتی تفاضلی روی نمونه کامپوزیت تقویت شده با الف) پارچه آزیست AAA ب) آزیست C ج) پارچه سرامیکی (آلفا درجه تخریب حرارتی است) (ادامه)



شکل ۱۱- تغییرات کسر حجمی زمینه پلیمری و زغال ایجاد شده روی نمونه‌های کامپوزیتی تقویت شده با (الف) پارچه آزبست AAA (ب) آزبست C (ج) پارچه سرامیکی



شکل ۱۲- تغییرات ظرفیت حرارتی ویژه نمونه‌های کامپوزیتی و زغال کامپوزیتی تقویت شده با (الف) پارچه آزبست AAA (ب) آزبست C (ج) پارچه سرامیکی

همان‌طور که در این نمودارهای توزیع دمایی نیز دیده می‌شود، در شار حرارتی پایین (شار 2500 kW.m^{-2}) خواص حرارتی عایق سرامیک - فنولیک از خواص حرارتی سایر عایق‌ها حتی عایق آزبست - فنولیک گرید AAA نیز بهتر است. در شار حرارتی بالا (شار 7000 kW.m^{-2}) خواص حرارتی عایق سرامیک - فنولیک تقریباً مشابه عایق آزبست - فنولیک گرید AAA بوده و تا حدودی نیز بهتر از آن است.

نکته مهم در این نمودارها آن است که خواص حرارتی عایق آزبست - فنولیک گرید C از گرید A بهتر است. علت این پدیده آن است که میزان جذب فنول آزبست گرید A از گرید C کمتر است و همین جذب کمتر فنول توسط الیاف آزبست گرید A باعث افت شدید خواص حرارتی این عایق می‌شود. به‌منظور تعیین میزان جذب، نمونه پس از ساخت در داخل کوره با دمای 700°C درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرد. از اختلاف وزن ماده باقیمانده (الیاف) با وزن اولیه قطعه می‌توان میزان جذب را محاسبه کرد.

نتایج آزمون شعله اکسی‌استیلن در شار حرارتی kW.m^{-2} 8000 در زمان 30 ثانیه به صورت توزیع درجه حرارت در سطح ضخامت 2 ، 4 و 6 میلی‌متر از سطح نمونه برای سه نمونه مورد بررسی در شکل (۱۲) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌کنید در این کامپوزیت‌ها دما در سطح حدود 2000 درجه سانتی‌گراد است و در ضخامت 2 میلی‌متر، رفتار هر سه کامپوزیت مشابه است. در ضخامت 4 میلی‌متر کامپوزیت تقویت‌شده با آزبست C کم‌ترین دما را نشان می‌دهد. اما در ضخامت 6 میلی‌متر تا ثانیه 27 ، کامپوزیت سرامیکی کم‌ترین میزان دما را دارد. در شکل (۱۳ و ۱۴) نمودارهای دمای پشت قطعات کامپوزیتی برای دو شار مختلف نشان داده شده است.

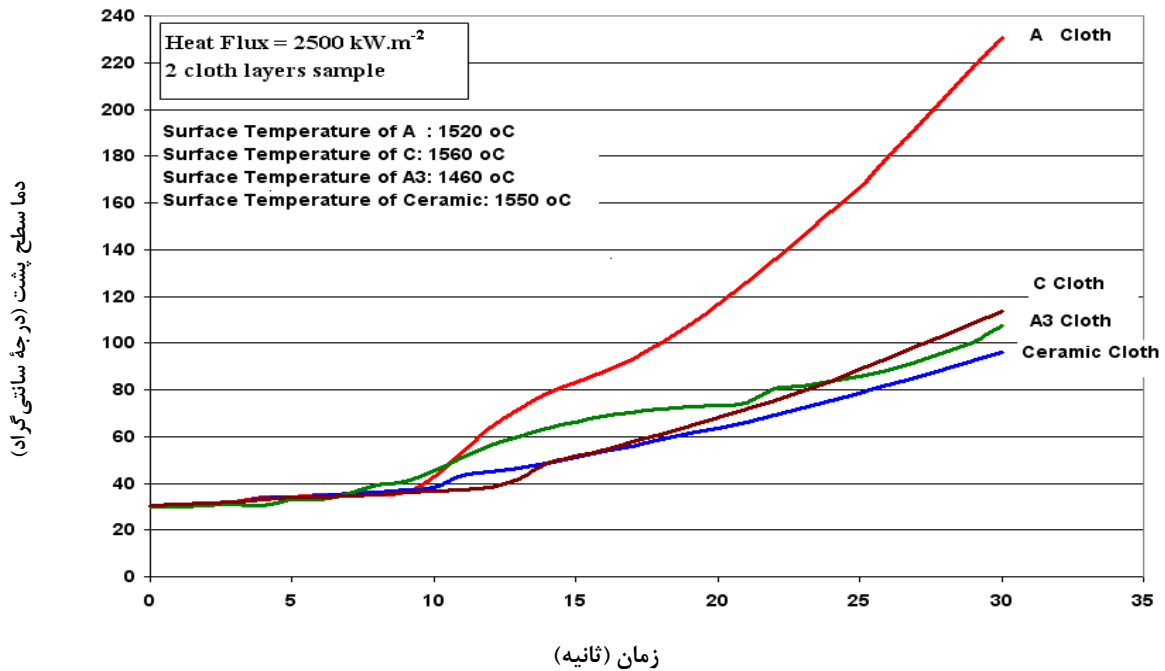
نتیجه‌گیری

در این مقاله به مقایسه آزمایشگاهی خواص حرارتی سه نوع کامپوزیت پایه فنولی پرداخته شده است. الیاف مورد استفاده در این مطالعه آزبست AAA، آزبست C و سرامیک بوده است. در میان تقویت‌کننده‌ها الیاف سرامیکی کم‌ترین میزان کاهش وزن را در دمای حدود 1400 درجه سانتی‌گراد نشان داد. همچنین گرمای فداشدن کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف سرامیکی بیشترین مقدار یعنی 961 kJ/kg را دارد. آنالیز حرارتی تفاضلی این قطعات نشان داد که قطعه تقویت‌شده با الیاف سرامیکی بیشترین زمان را برای تخریب نیاز دارد و علاوه بر آن بیشترین ظرفیت حرارتی را دارد. همچنین در آزمون‌های شعله نیز تا ثانیه 27 ، در ضخامت

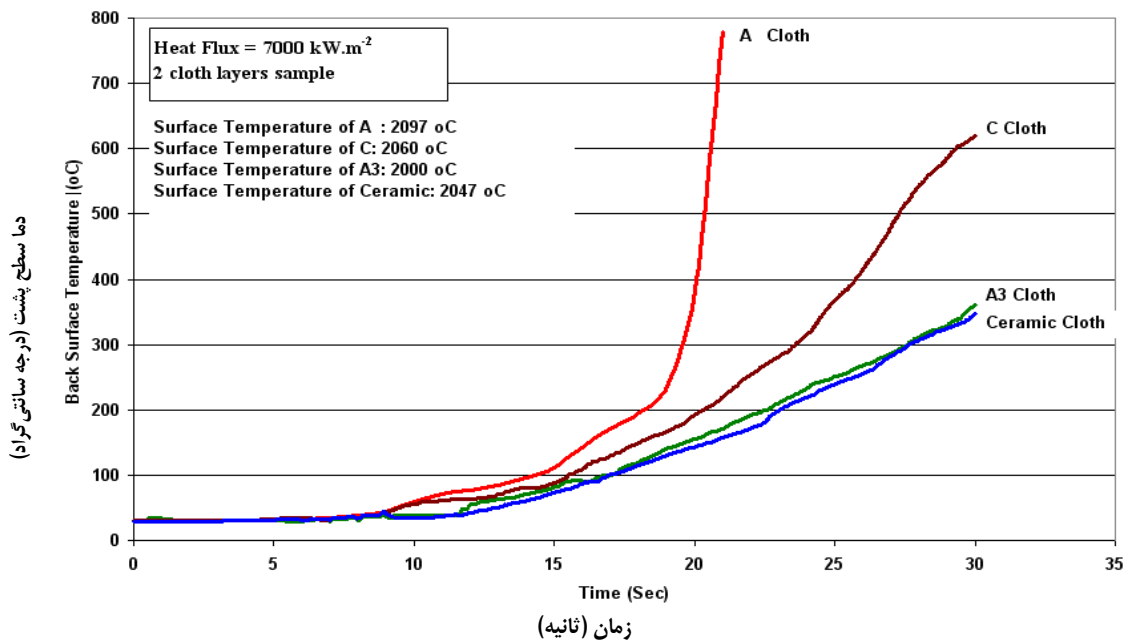
در شکل (۹) آنالیز حرارتی تفاضلی (DTA) برای سه نمونه کامپوزیت تولیدشده نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌کنید زمان لازم برای تخریب کامل حرارتی نمونه‌های کامپوزیت رزول با تقویت‌کننده‌های آزبست نوع AAA، C و پارچه سرامیک به ترتیب معادل 8500 ، 8600 و 8700 ثانیه است.

همچنین ماکزیمم نرخ تخریب برای این تقویت‌کننده‌ها به ترتیب برابر $0/0004$ ، $0/00035$ و $0/0005$ است. بنابراین کامپوزیت تقویت‌شده با پارچه سرامیکی بیشترین زمان تخریب را دارد ولی در عین حال ماکزیمم نرخ تخریب آن از ماکزیمم نرخ تخریب دو کامپوزیت دیگر بیشتر است.

در شکل (۱۰) تغییرات کسر حجمی زمینه پلیمری و زغال ایجاد شده روی نمونه‌های کامپوزیتی نشان داده شده است. این نمودارها نیز به کمک آزمون ثقلی حرارتی (TGA) و به کمک دستگاه پراکین المر انجام شده است. همان‌طور که در شکل (۱۰) ملاحظه می‌کنید برای هر سه قطعه کامپوزیتی تست تا دمای 1700 درجه سانتی‌گراد انجام شده است. همان‌طور که از شکل نیز مشهود است، به جز کامپوزیت تقویت‌شده با آزبست AAA، رزین در سایر کامپوزیت‌ها به‌طور کامل به زغال تبدیل شده است. این موضوع را می‌توان از برابر بودن درصد نهایی زغال با درصد اولیه رزین متوجه شد. همچنین در کامپوزیت تقویت‌شده با آزبست AAA دمایی که در آن کسر حجمی زغال و رزین با یکدیگر برابر می‌شوند نسبت به دو نوع کامپوزیت دیگر بیشتر است. در شکل (۱۱) تغییرات ظرفیت حرارتی ویژه سه نوع کامپوزیت که با استفاده از کالری‌متر تفاضلی روبشی تعیین شده نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، ظرفیت حرارتی ویژه در هر سه نوع کامپوزیت با بالا رفتن دما افزایش می‌یابد ولی روند این افزایش بسیار کند و مقدار آن ناچیز است. میزان ظرفیت حرارتی کامپوزیت تقویت‌شده با آزبست C بیشترین مقدار را دارد. همان‌طور که در شکل (۱۰) نیز نشان داده شده است، با توجه به اینکه در شرایط کارکرد بخشی از کامپوزیت به زغال تبدیل می‌شود لازم است تا رفتار حرارتی زغال ایجاد شده نیز بررسی شود. بنابراین میزان تغییرات ظرفیت حرارتی زغال کامپوزیت فنولی با دما نیز تعیین شد که نمودار روند این تغییرات در شکل (۱۱) نشان داده شده است. به‌رغم تغییراتی که در مورد ظرفیت حرارتی ویژه کامپوزیت‌ها مشاهده شد، در مورد زغال‌های کامپوزیتی این ظرفیت حرارتی با دما رفتار ثابتی دارد و چندان به نوع تقویت‌کننده وابسته نیست.



شکل ۱۳- نمودار توزیع دمای حاصل از این تست برای سطح پشتی عایق‌ها در شار حرارتی ۲۵۰۰ kW.m⁻²



شکل ۱۴- نمودار توزیع دمای حاصل از این تست برای سطح پشتی عایق‌ها در شار حرارتی ۷۰۰۰ kW.m⁻²

کامپوزیت تهیه شده، کامپوزیت تقویت شده با الیاف سرامیکی بهترین گزینه برای تقویت آن‌هاست. همچنین پس از آن کامپوزیت تقویت شده با آزبست AAA قرار دارد و نهایتاً کامپوزیت تقویت شده با آزبست C قرار می‌گیرد.

۶ میلی‌متر این کامپوزیت بهترین نتایج به دست آمد. در نهایت در آزمون تعیین دما در پشت عایق در هر دو شار حرارتی کامپوزیت تقویت شده با سرامیک بهترین نتایج به دست آمد. به طور کلی از نتایج به دست آمده مشخص است که در شرایط کاری که در آن دمای بسیار بالایی وجود دارد، از بین سه

مراجع

- [7] Bahramian, A. R., Kokabi, M., Beheshty, M. H. and Famili, M. H. N., "Thermal Degradation Process of Resol Type Phenolic Matrix/Kaolinite Layered Silicate Nanocomposite," *Iranian Polymer Journal*, Vol. 16, No. 6, 2007, pp. 375-387.
- [8] Bahramian, A. R., Kokabi, M., Famili, M. H. N. and Beheshty, M. H., "High Temperature Ablation of kaolinite Layered Silicate/Phenolic Resin/Asbestos Cloth Nanocomposite," *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 150, No. 1, 2008, pp. 136-145.
- [9] Bahramian, A. R., Kokabi, M., Famili, M. H. N. and Beheshty, M. H., "Ablation and Thermal Degradation Behaviour of a Composite Based on Resol Type Phenolic Resin: *Process Modeling and Experimental*", *Polymer*, Vol. 47, Issue 10, 2006, pp. 3661-3673.
- [10] Jia, X., Li, G., Yu, Y., Sui, G., Liu, H., Li, Y., Li, P. and Yang, X., "Ablation and Thermal Properties of Ethylene-Propylene- Diene Elastomer Composites Reinforced with Polysulfonamide Short Fibers," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 113, Issue 1, 2009, pp. 283-289.
- [11] Vignoles, G. L., Lachaud, J., Aspa, Y. and Goyh n che, J. M., "Ablation of Carbon-Based Materials: Multiscale Roughness Modelling," *Composites Science and Technology*, Vol. 69, Issue 9, 2009, pp. 1470-1477.
- [12] Srebrenkoska, V., Bogoeva-Gaceva, G. Dimeski, D., "Composite Material Based on an Ablative Phenolic Resin and Carbon Fibers," *Journal of the Serbian Chemical Society*, Vol. 74, No. 4, 2009, pp. 441-453.
- [1] Lin, J. L. and Yang, C. S., "Heat Transfer Analysis of Charring Ablators Under Aerodynamic Heating," *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2005, Vol. 77, No.3, pp. 214-221.
- [2] Dec, J. A. and Braun, R. D., "An Approximate Ablative Thermal Protection System Sizing Tool for Entry System Design", *Collection of Technical Papers- 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, Vol. 13, 2006, pp. 9396-9410.
- [3] Vaia, R. A., Price, G., Ruth, P. N., Nguyen, H. T. and Lichtenhan, J., "Polymer/layered Silicate Nanocomposites as High Performance Ablative Materials," *Applied Clay Science*, Vol. 15, Issue 1-2, 1999, pp. 67-92.
- [4] Shu-Ping, L., Ke-zhi, L., He-Jun, L., Yu-Long, L. and Qin-Lu, Y., "Effect of HfC on the Ablative and Mechanical Properties of C/C Composites," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 517, Issue 1-2, 2009, pp. 61-67.
- [5] Bai, G., Meng, S., Zhang, B. and Liu, Y., "Prediction on Carbon/Carbon Composites Ablative Performance by Artificial Neural Net," *Journal Materials Science and Technology*, Vol. 24, No. 6, 2008, pp. 945-952.
- [6] Bahramian, A. R. and Kokabi, M., "Ablation Mechanism of Polymer Layered Silicate Nanocomposite Heat Shield," *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 166, No. 1, 2009, pp. 445-454.