

## Manufacturing Method of Carbon/Phenolic Composites and its Implication on Ablative Characteristics

Jamal Zamani\* and Vahid Moosabeiki

Department of Mechanical Engineering, K.N. Toosi University of Technology, P.O. Box: 19395-1999  
Tehran, Iran

Received 31 October 2012, accepted 14 July 2013

### ABSTRACT

Carbon/phenolic composites are used in the nozzle parts of solid rocket motors due to their heat-resisting, ablation, and high strength characteristics, which are required to endure the high temperature and pressure of combustion gas passing through the nozzle. One of the most important factors on erosion rate is the void content of the ablative composites. Facilities should be designed to simplify the exhaust of volatile components, in order to reduce the void content in the manufactured samples. Accordingly, to reduce the void percentage of carbon/phenolic composites in this study, samples were manufactured by the vacuum bag molding technique and cured in an autoclave. In order to compare the effect of manufacturing process on the ablation characteristics of carbon/phenolic composites, another batch of samples was produced by the acid curing method. The specimens were exposed to plasma torch flame based on ASTM E285-80. The results showed that the void percentage of samples which was manufactured by the autoclave process was 60% lower than the acid-cured samples, and this led to reduce the linear erosion rate of these composites.

#### Keywords:

carbon/phenolic  
composite,  
thermal ablation,  
autoclave,  
acid curing,  
plasma torch

(\*)To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: zamani@kntu.ac.ir

# اثر روش ساخت کامپوزیت‌های کربن - فنولی بر مقاومت فداشوندگی آنها

جمال زمانی\*، وحید موسی بیگی

تهران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مکانیک، صندوق پستی ۱۹۳۹۵-۱۹۹۹

دریافت: ۹۱/۸/۱۰، پذیرش: ۹۲/۴/۲۳

## چکیده

کامپوزیت‌های کربن - فنولی به دلیل مقاومت گرمایی، فداشوندگی و استحکام زیاد کاربرد گسترده‌ای در نازل موتور پرتابه‌های سوخت جامد دارند. این نوع از کامپوزیت‌ها باید قابلیت تحمل دما و فشار زیاد ناشی از عبور گازهای احتراقی نازل را داشته باشند. از عوامل اثرگذار بر سرعت سایش کامپوزیت‌های فداشونده، مقدار تخلخل موجود در این نوع از کامپوزیت‌هاست. برای کاهش درصد تخلخل در نمونه‌های ساخته شده باید شرایطی فراهم آورد که خروج مواد فرار و حلال‌های موجود در زمینه کامپوزیت‌های پلیمری به راحتی انجام شود. از این رو در پژوهش حاضر، برای کاهش درصد تخلخل نمونه‌های کامپوزیتی کربن - فنولی از روش قالب‌گیری درون کیسه خلأ و پخت اتوکلاو استفاده شده است. دسته‌ای از نمونه‌های کربن - فنولی نیز به روش پخت اسیدی ساخته شده‌اند. برای مقایسه اثر روش ساخت بر مقاومت فداشوندگی کامپوزیت‌های کربن - فنولی، مطابق استاندارد ASTM E258-80، از دو روش مشعل اکسی استیلن و مشعل پلاسما استفاده شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد، افزایش چگالی و کاهش مقدار تخلخل در کامپوزیت‌های کربن - فنولی باعث افزایش بازده فداشونده می‌شود. درصد تخلخل نمونه‌های ساخته شده به روش اتوکلاو تا ۶۰٪ کمتر از نمونه‌های ساخته شده به روش پخت اسیدی است. همچنین، این روش باعث کاهش سرعت سایش خطی این نمونه‌ها شده است. وجود پلی‌وینیل بوتیرال رزین به عنوان افزودنی مناسب باعث افزایش چقرمگی ساختار کامپوزیت شده است. این افزایش چقرمگی باعث کاهش اثرهای گرمای مکانیکی و در نتیجه کمتر شدن سرعت سایش شده است.

## واژه‌های کلیدی

کامپوزیت کربن - فنولی،  
فداشوندگی گرمایی،  
اتوکلاو،  
پخت اسیدی،  
مشعل پلاسما

## مقدمه

فداشوندگی پدیده‌ای خورنده است که در نتیجه آن، بخش‌هایی از ماده که در برابر شعله با دما، فشار و سرعت زیاد قرار گرفته است، با ترکیبی از عوامل گرم‌مکانیکی، گرم‌شیمیایی و گرم‌فیزیکی جدا می‌شود [۱]. مقاومت فداشوندگی، از خواص کلیدی است که قابلیت و عمر ماده کامپوزیتی مقاوم به گرما را تحت شرایط فداشوندگی نشان می‌دهد. کامپوزیت‌های به کار رفته در نازل‌ها و سپرهای گرمایی برای کاربردهای هوافضا، تحت چنین شرایطی قرار دارند. کارایی کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن برای مقاصد مقاوم به فداشوندگی در دماهای زیاد شناخته شده است. این مسئله از اهمیت زیادی برخوردار است که الیاف تقویت‌کننده و زمینه کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن، زمانی که در محیط اتمسفر در معرض شرایط فداشونده با دمای  $3000^{\circ}\text{C}$  -  $2000^{\circ}\text{C}$  قرار می‌گیرد، ساختار، خواص و شکل خود را طی فرایند فداشوندگی تا بیشترین حد و طولانی‌ترین زمان ممکن حفظ کند [۲].

زمانی که که مواد کامپوزیتی مقاوم در برابر سایش، در محیط‌های ساییده قرار می‌گیرند، در ابتدا به عنوان سپر گرمایی عمل می‌کنند. با افزایش گرمادهی، لایه بیرونی گرانبه‌تر می‌شود و جرمی اسفنج‌شکل از زغال را تشکیل می‌دهند. در نهایت، لایه زغال کربن متخلخل تشکیل می‌شود که این زغال تشکیل شده، به عنوان عایق گرمایی عمل می‌کند. همچنین، گازهای خارج شده از پلیمر تجزیه شده با ایجاد یک اثر تزریق جرم به سرد شدن قطعه کمک می‌کند. شایان ذکر است، هدف اصلی تمام پژوهشگران درباره ساخت کامپوزیت‌های فداشونده گرمایی به عنوان سپر گرمایی، کاهش سرعت سایش خطی و

سرعت سایش وزنی است.

در میان گرماسخت‌های مرسوم، رزین‌های فنولی حین تجزیه گرمایی، محصول زغال بیشتری تولید می‌کنند. به همین دلیل، از این ترکیبات به شکل گسترده به عنوان مواد سطحی زغال‌شونده استفاده می‌شود. توجه به این نکته ضروری است که زغال تشکیل شده نسبتاً ضعیف است و با توجه به نیروی زیاد برشی ایجاد شده در سرعت‌های زیاد، زغال به شکل مکانیکی، از سطح کامپوزیت جدا می‌شود. به همین سبب از الیاف کربن، سیلیکون دی‌اکسید، اکسیدهای نسوز، آزبست معدنی یا حتی شیشه برای کمک به باقی ماندن زغال روی سطح کامپوزیت استفاده می‌شود [۳].

در جدول ۱، پژوهش‌های اخیر انجام شده در زمینه ساخت محافظ‌های گرمایی فداشونده آمده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، از رزین فنولی و قطران زغال‌سنگ به عنوان زمینه و از پارچه‌های کربن به عنوان تقویت‌کننده کامپوزیت‌ها استفاده شده است. مقایسه نتایج استخراج شده از منابع، حاکی از آن است که استفاده از رزین‌های فنولی نوع رزول، که جزو رزین‌های گرماسخت‌اند، به عنوان زمینه کامپوزیت‌های فداشونده گرمایی، بیشترین بازده را دارد و علت آن تشکیل زغال مؤثر حین پدیده پیرولیز است [۳]. اگرچه پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد که شاخص عایق بودن کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف آزبست بسیار بیشتر از کامپوزیت‌های تقویت شده با پارچه کربن است. ولی با توجه به این نکته که سرعت سایش آنها بسیار بیشتر از کامپوزیت‌های تقویت شده با پارچه کربن است و همچنین، به علت افزایش نگرانی‌ها در استفاده از آزبست، استفاده از این ماده به‌طور کلی منسوخ شده

جدول ۱- مواد استفاده شده توسط پژوهشگران مختلف به عنوان زمینه و تقویت‌کننده و آزمون‌های انجام شده.

مرجع	نوع آزمون	تقویت‌کننده	زمینه
[۲]	مشعل قوس پلاسما	الیاف کربن پایه PAN، ۸ رشته تار و پود	ماتریس فنولی - رزول
[۶]	مشعل اکسی استیلن	پارچه آزبست	رزین فنولی - رزول
[۷]	مشعل قوس پلاسما	الیاف کربن پایه PAN	قیر قطران زغال‌سنگ
[۸]	موتور راکت با سوخت نفت سفید و اکسیژن مایع	الیاف کربن پایه PAN	قیر قطران زغال‌سنگ
[۹]	مشعل قوس پلاسما	الیاف کربن پایه PAN تابیده شده	رزین فنولی - رزول
[۱۰]	مشعل قوس پلاسما	الیاف کربن با پیش‌زمینه فاز گازی (VGCF)	رزین فنولی SC-1008
[۴]	مشعل اکسی استیلن	پارچه کربن پایه PAN، الیاف شیشه بافته شده	رزین فنولی محلول در الکل از نوع رزول
[۱۸]	مشعل اکسی استیلن	پارچه‌های پنبه‌نسوز (آزبست)	رزین فنولی مایع

شده بر خواص فداشوندگی کامپوزیت‌های کربن - فنولی، تنها از یکی از دو روش مشعل پلاسما و مشعل اکسی‌استیلن بهره گرفته شده است، درحالی‌که در این پژوهش سعی بر آن بوده که از هر دو روش ذکر شده، بهره گرفته و پارامترهایی نظیر سرعت سایش خطی و وزنی نمونه‌ها با یکدیگر مقایسه شوند. همچنین، با استفاده از روش تحلیل آماری رویه پاسخ اثر دو مشعل پلاسما و اکسی‌استیلن بر نمونه‌های ساخته شده، بررسی شد و سرعت سایش خطی و وزنی نمونه‌های ساخته شده مطالعه شده است.

## تجربی

### مواد

از پارچه کربن با استحکام زیاد بر پایه پلی‌آکریلونیتریل (PAN) با بافت ساده (۹۰-۰) TC33 3K محصول شرکت Tairyfil تایوان به عنوان تقویت‌کننده کامپوزیت‌های کربن فنولی استفاده شده است. رزین فنولی نوع رزول (IL800) محصول شرکت رزیتان به عنوان زمینه این نوع از کامپوزیت‌ها استفاده شد. برای افزایش بهبود خواص مقاومت در برابر گرما، فداشوندگی گرمایی، چسبندگی لایه‌ها و نیز کاهش رسانایی گرمایی در راستای عمود بر سطح نمونه‌های کامپوزیتی، می‌توان فرایندهای مختلفی را روی مواد تشکیل‌دهنده این نوع کامپوزیت‌ها انجام داد یا از مواد افزودنی دیگر برای بهبود این خواص استفاده کرد. برای تقویت فاز زمینه، از پلی‌وینیل بوتیرال (PVB) استفاده شد. پاراتولون سولفونیک اسید (PTSA) خریداری شده از Aldrich به عنوان عامل پخت رزین رزول استفاده شده است. مشخصات پاراتولون استفاده شده در این پژوهش در جدول ۳ آمده است. در این پژوهش در حدود ۲۰٪ وزن ماتریس نمونه‌ها را رزین PVB محلول در الکل تشکیل می‌دهد. در محلول رزین PVB

است [۴]. از طرفی در تمام پژوهش‌های اخیر، پارچه‌های کربن به عنوان تقویت‌کننده کامپوزیت‌های فداشونده، بیشترین استفاده را داشته‌اند. کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن که دارای زمینه‌ای از رزین پلیمری هستند را نیز می‌توان در مواد مقاوم به فداشوندگی استفاده کرد که نیازمند محیط‌های تأخیردهنده، هزینه کم تولید و بازده متوسط هستند [۵].

از این رو در پژوهش حاضر، برای بررسی کاهش مقدار تخلخل کامپوزیت‌های کربن - فنولی ساخته شده درون اتوکلاو چهار دسته نمونه با زمینه‌های مختلف به روش قالب‌گیری درون کیسه خلأ به شکل زیر تهیه شده است:

- کامپوزیت‌های زمینه رزول تقویت‌شده با پارچه کربن (C/P)،
  - کامپوزیت‌های زمینه رزول تقویت‌شده با پارچه کربن به همراه بوتیرال رزین (C/P/PVB)،
  - کامپوزیت‌های زمینه رزول تقویت‌شده با پارچه کربن قرار گرفته در محلول پاراتولون سولفونیک اسید (C/P/PTSA) و
  - کامپوزیت‌های زمینه رزول تقویت‌شده با پارچه کربن قرار گرفته در محلول پاراتولون سولفونیک اسید به همراه بوتیرال رزین (C/P/PVB/PTSA). در جدول ۲ مشخصات این نمونه‌ها آمده است.
- روش اتوکلاو مشابه فرایند کیسه خلأ است، با این تفاوت که لایه‌ها در معرض فشار بیشتری قرار گرفته و قطعه‌های فشرده‌تری را ایجاد می‌کند. مشکل اصلی و عمده، هزینه اولیه زیاد و دشواری فرایند است. از مزایای آن امکان تولید قطعاتی با شکل‌های پیچیده و ابعاد بسیار بزرگ است [۱۱].

در این پژوهش سعی شد، با اضافه کردن پاراتولون سولفونیک اسید (PTSA) به دو دسته از نمونه‌ها به روش پخت اسیدی، اثر فرایند ساخت بر مقدار درصد تخلخل نمونه‌های ساخته شده بررسی شود. همچنین همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، در پژوهش‌های انجام شده برای بررسی اثر چگالی و مقدار تخلخل نمونه‌های ساخته

جدول ۲- مشخصات نمونه‌های کامپوزیتی کربن - رزول.

PVB(wt%)	PTSA(wt%)	پارچه کربن (wt%)	رزول (wt%)	کد نمونه	نوع کامپوزیت رزول
-	-	۵۰	۵۰	C/P	تقویت‌شده با پارچه کربن
-	۴-۵	۵۰	۴۵-۴۶	C/P/PTSA	تقویت‌شده با پارچه کربن به همراه پاراتولون سولفونیک اسید
۱۸-۲۰	-	۵۰	۳۰-۳۲	C/P/PVB	تقویت‌شده با پارچه کربن به همراه بوتیرال رزین
۱۸-۲۰	۴-۵	۵۰	۲۵-۲۸	C/P/PTSA/PVB	تقویت‌شده با پارچه کربن به همراه پاراتولون سولفونیک اسید و بوتیرال رزین

جدول ۳- مشخصات پاراتولون سولفونیک اسید استفاده شده [۱۲].

نام شیمیایی	فرمول مولکولی	وزن مولکولی (g/mol)	حالت ظاهری	دمای جوش (°C)	pH
۴- متیل بنزوسولفونیک اسید	CH <sub>3</sub> C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> SO <sub>3</sub> H	۱۷۲/۲۰	پودر سفید	۱۴۰	۸

حلال ۷۵٪ است.

## دستگاه‌ها و روش‌ها

### آزمایش‌های انجام شده روی مواد اولیه

برای پی بردن به درصد کاهش وزن رزول استفاده شده در دماهای مختلف، به کمک گراموزنسنج (TGA) مدل Polymer Laboratories ساخت انگلستان، آزمون TGA روی رزول انجام شد. پخت رزین فنولی معمولاً از دمای ۱۱۰°C شروع می‌شود و بیشینه پخت آن در دماهای ۱۶۰°C یا ۱۷۰°C است. واکنش‌های پخت آنها به دلیل اینکه از نوع واکنش‌های تراکمی است، همراه با آزاد شدن ماده‌ای با وزن مولکولی کم نظیر آب یا آمونیاک است که به حالت گاز خارج می‌شود. با توجه به اینکه بیشترین تغییرات انرژی در اثر گرم شدن رزول در پیک‌های گرمازا و گرماگیر رخ می‌دهد، این دماها، دمای اصلی پخت رزول در ساخت کامپوزیت‌هاست [۲].

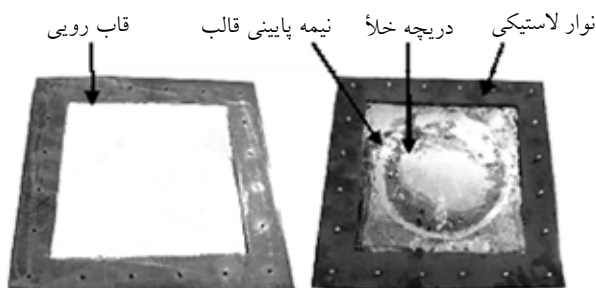
### تهیه پیش‌آغشته‌های کربن فنولی

برای تهیه پیش‌آغشته‌های کربن - رزول، پارچه کربن با درنظر گرفتن درصد مشخص از تقویت‌کننده، نمونه کامپوزیتی (در اینجا ۵۰٪ وزنی) در ابعاد مدنظر (۱۰×۲۱۰ cm) بریده شدند. برای تعیین درصد رزین باقی‌مانده به الیاف در نمونه نهایی، پیش از آغشته‌سازی پارچه کربن به رزین، پارچه‌های خشک وزن شدند. با آغشته‌کردن پارچه‌های خشک به رزین، نمونه‌های آماده شده درون گرم‌خانه به مدت ۳۰ min در دمای ۱۰۰°C پیش‌پخت شدند. این چرخه پیش‌پخت به دلیل ضخیم‌بودن نمونه‌ها (۱۰ mm)، برای جلوگیری از محبوس شدن مواد فرار موجود در رزین (۹٪ رزین اتانول) و به‌دست

آوردن نمونه‌هایی با درصد تخلخل کمتر ضروری است. با توجه به اینکه رزین استفاده شده در پژوهش حاضر دارای حدود ۲۰٪ درصد حلال است، پس از آغشته‌کردن الیاف با این رزین حلال تبخیر می‌شود. وقتی الیاف آغشته به رزین پخت شدند، معمولاً حدود ۵٪ تا ۸٪ افت وزنی در دمای نهایی پخت (۱۶۰°C) به دلیل گازهای حاصل از واکنش‌های پخت مشاهده می‌شود. بنابراین لازم است، این مقدار افت وزنی برای دست‌یابی به درصد‌های مدنظر در قطعه نهایی که در جدول ۴ آمده است، هنگام آغشته‌سازی پارچه‌های کربن منظور شود. پس از این مرحله، لایه‌های پارچه پیش‌آغشته شده درون قالب روی هم قرار داده می‌شوند تا لایه نهایی به‌دست آید و نمونه، آماده مراحل بعدی شود.

### ساخت کامپوزیت‌های کربن - فنولی

از دستگاه اتوکلاو و روش لایه‌گذاری درون کیسه خلأ برای ساخت نمونه‌ها استفاده شده است (شکل ۱). در این روش، لایه‌های پیش‌آغشته درون قالب فلزی (شکل ۲) لایه‌گذاری می‌شوند. با اضافه‌کردن اجزائی به آن، مقدار رزین قطعه مدنظر کنترل شده و اعمال صحیح فشار اتوکلاو روی لایه‌گذاری تضمین می‌شود. این اجزا با حداکثر دمای پخت و فشار مورد نیاز برای پخت سامانه ماتریس متناسب‌اند [۱۳]. قرارگیری اجزای مربوط به روش قالب‌گیری درون کیسه خلأ در این پژوهش مطابق روش رایج بوده و از قطعات فیلم جداکننده، مواد جداساز، جریان‌دهنده هوا (bleeder)، لایه مسدودکننده، پارچه جاذب (breather)، آب‌بند (dam) و کیسه خلأ استفاده شده است که معمولاً در آماده‌سازی پخت لایه‌ها درون اتوکلاو به‌کار گرفته می‌شوند. در شکل ۲، قالب استفاده شده برای



شکل ۲- قالب استفاده شده برای فرایند کیسه خلأ درون اتوکلاو.



شکل ۱- نحوه قرارگیری قالب درون اتوکلاو.

چگالی پلاستیک‌های جامد را پوشش می‌دهد. روش آزمون مبتنی بر مشاهده ارتفاعی است که در آن نمونه مورد آزمون غوطه‌ور درون ستون مایع، گرا دیان چگالی را نشان می‌دهد. صحت نتایج این روش آزمون با خطای کمتر از ۰/۰۵٪ مورد تأیید است [۱۳].

#### اندازه‌گیری رسانندگی گرمایی

نمونه‌های ساخته شده برای آزمون شعله دارای ابعاد متوسط  $10 \times 10 \times 0.8 \text{ cm}^3$  بودند. پیش از آزمون شعله، رسانندگی گرمایی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد (جدول ۴). اندازه‌گیری رسانندگی گرمایی با دستگاه TCA 200 مدل Taurus ساخت آلمان در دمای محیط انجام شد.

#### آزمون فداشوندگی گرمایی

آزمون فداشوندگی گرمایی روی نمونه‌های کامپوزیتی بر اساس استاندارد ASTM E258-80 [۱۴] انجام می‌شود. این استاندارد مربوط به آزمایش فداشوندگی با مشعل اکسی استیلن است. در پژوهش‌های اخیر [۷، ۹، ۱۰، ۱۵]، از مشعل پلازما نیز برای انجام این آزمون استفاده شده است. در پژوهش حاضر از هر دو نوع مشعل پلازما استفاده شده است. تفاوت عمده این دو روش در گازهای احتراقی در مشعل و

جدول ۴- رسانندگی گرمایی ثبت شده با دستگاه TCA 200 برای نمونه‌های کامپوزیت.

تکرار	شار گرمایی (MW/m <sup>2</sup> )	رسانندگی گرمایی (W/mK)	نوع کامپوزیت
۱	۶۷/۴۵	۰/۵۹۲۰	C/P
۲	۶۷/۶۲	۰/۵۹۲۶	
۳	۶۷/۶۲	۰/۵۹۲۶	
۱	۶۱/۲۵	۰/۱۷۱۰	C/P/PTSA
۲	۶۱/۱۲	۰/۱۷۱۲	
۳	۶۱/۳۷	۰/۱۶۷۸	
۱	۴۵۰/۷۹	۰/۳۸۲۵	C/P/PVB
۲	۵۱۱/۹۹	۰/۳۹۴۶	
۳	۵۱۴/۸۱	۰/۳۹۰۶	
۱	۳۴۵/۷۸	۰/۲۵۴۸	C/P/PTSA/PVB
۲	۳۴۶/۲۹	۰/۲۵۴۹	
۳	۳۴۶/۶۵	۰/۲۵۶۲	

ساخت نمونه‌های کامپوزیتی درون اتوکلاو آمده است. نمونه‌های بررسی شده در این پژوهش، با دستگاه اتوکلاو متعلق به پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران ساخته شده‌اند. این دستگاه برای حداکثر فشارکاری ۳۰ bar و دمای نهایی ۲۰۰°C طراحی شده و مجهز به سه ترموکوپل است. این ترموکوپل‌ها در سه نقطه جداره داخلی بدنه جای‌گذاری شده و دمای پخت با کنترل‌کننده Jamo در زمان‌های دلخواه ثابت نگهداری می‌شود. مشخصات چهار دسته کامپوزیت کربن - فنولی ساخته شده با دستگاه اتوکلاو به روش لایه‌گذاری دستی درون کیسه خلأ در جدول ۲ آمده است.

#### چرخه پخت

برای پخت نمونه‌های کامپوزیتی کربن، دمای درون اتوکلاو پس از قرارگیری قالب درون اتوکلاو، از دمای محیط با سرعت گرمایش  $10^\circ\text{C}/\text{min}$  به دمای  $105^\circ\text{C}$  افزایش داده شد، نمونه‌های کامپوزیتی در این دما به مدت ۱۵ min بدون اعمال فشار قرار داده شدند. علت عدم اعمال فشار در این مرحله، جلوگیری از خروج رزین از درون لایه‌های کامپوزیت چندلایه‌ای است. در مرحله بعد، دما تا  $135^\circ\text{C}$  افزایش داده شد و با اعمال فشار ۷ bar، نمونه‌ها در این شرایط به مدت ۱۵ min باقی ماندند. در مرحله آخر دمای داخلی اتوکلاو زیر فشار ثابت ۷ bar تا دمای  $160^\circ\text{C}$  افزایش داده شد و نمونه‌ها در این دما به مدت ۱ h درون اتوکلاو باقی ماندند تا رزین زمینه حداکثر استحکام خود را به دست آورد. در تمام فرایند چرخه پخت، از مکش یا اعمال خلأ، برای خارج کردن گازهای فرار و ایزوله کردن نمونه از اتمسفر استفاده می‌شود. خلأ معادل ۰/۸ bar - به کمک پمپ خلأ درون محفظه کیسه خلأ ایجاد می‌شود.

شایان ذکر است، چرخه پخت اعمالی برای نمونه‌های حاوی PTSA نیز شامل یک مرحله پیش‌پخت برای تکمیل واکنش PTSA با رزول است. این پیش‌پخت در دمای  $80^\circ\text{C}$  به مدت ۱۰ min انجام می‌گیرد. طی این مدت، از خلأ استفاده نمی‌شود تا از خروج رزین جلوگیری شود. در مرحله بعد، عمل پخت در دمای  $105^\circ\text{C}$  طی ۱۵ min کامل می‌شود. همچنین برای رسیدن به حداکثر استحکام، عملیات پخت تکمیلی از دمای  $25^\circ\text{C}$  تا  $160^\circ\text{C}$  ادامه می‌یابد.

#### چگالی سنجی

جرم نمونه‌ها با دستگاه Sartorius GE 2102 مدل GE 2102 ساخت آلمان در شرایط آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد. برای به دست آوردن چگالی، مطابق استاندارد ASTM D1505 [۱۳] از تجهیزات پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی استفاده شد. این روش آزمون تعیین

مقدار شار گرمایی خروجی از این دو مشعل است.

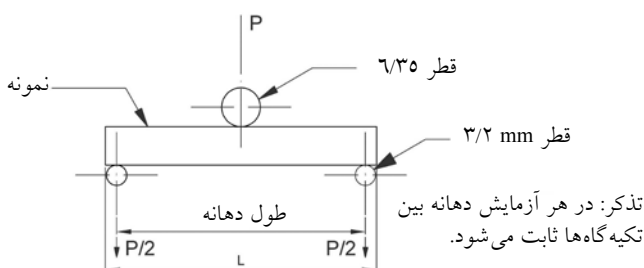
### آزمون فداشوندگی با مشعل پلاسما

با توجه به اینکه برای این آزمون استاندارد مجزایی وجود ندارد، در این پژوهش، از شرایط استاندارد مشعل اکسی استیلن (ASTM E258-80) استفاده شده است. البته این روش نیز قادر نیست شرایط واقعی محیط موتور موشک با سوخت جامد (SRM) را شبیه‌سازی کند و تنها برای مشخص کردن سازوکار فداشوندگی و تعیین ساختار گرمایی مواد می‌تواند استفاده شود [۱۶]. از مشعل پلاسما شرکت Metallisation متعلق به شرکت پودرافشان اصفهان استفاده شده است.

برای آزمون فداشوندگی پارامترهای تنظیم‌شدنی دستگاه فشار گاز آرگون و شدت جریان منبع الکتریسیته به ترتیب ۸ bar و ۹۰۰ A انتخاب شدند. با توجه به این تنظیمات، دمای شعله در فاصله ۳ cm از نوک نازل برابر ۲۷۰۰°C و شار گرمایی آن ۱۵ MW/m<sup>2</sup> است. دمای شعله به کمک پیرومتر نوری دورنگی اندازه‌گیری شده است. گاز استفاده شده برای تولید شعله خنثی درون مشعل پلاسما، آرگون است.

### آزمون برش تیر کوتاه

برای مشخص کردن استحکام برشی بین‌لایه‌ای نمونه‌های کامپوزیتی مطابق استاندارد ASTM D2344 [۷] از دستگاه Amsler/Zwick، ۵۰ تن استفاده شده است. نمونه آزمایش یک تیر کوتاه بریده شده از چندلایه‌ای تخت است. استحکام برشی که با این روش به دست می‌آید، معیار مناسبی برای کنترل کیفیت است [۷]. هدف از انجام این آزمون مقایسه استحکام برشی نمونه‌های کامپوزیتی استفاده شده در این پژوهش بوده و نیز رابطه مقاومت فداشوندگی نمونه‌های کامپوزیتی با استحکام چسبندگی لایه‌های آنها بحث و بررسی شده است. نمونه‌های آزمون برش مطابق شکل ۳ از وسط بارگذاری می‌شوند. مقدار نسبت طول دهانه بارگذاری به ضخامت نمونه، ۴ در نظر گرفته شده است و سرعت حرکت کلگی عرضی برای آزمون نمونه ۱ mm/min است [۷]. هر اندازه‌گیری سه مرتبه تکرار شده است. استحکام برشی ظاهری یا استحکام تیر کوتاه از معادله (۳) به دست می‌آید:



شکل ۳- طرح کلی بارگذاری برشی افقی (نمونه چندلایه‌ای تخت) [۷].

### آزمون فداشوندگی گرمایی به وسیله مشعل اکسی استیلن

هدف از انجام آزمون فداشوندگی گرمایی، تعیین مقدار مقاومت گرمایی قطعه کامپوزیتی در برابر گرمای ایجاد شده ناشی از شعله با دما و شار گرمایی مشخص است. برای انجام آزمون مواد عایق گرما در برابر گرمای شعله ناشی از ترکیب گاز اکسیژن و استیلن، استاندارد ASTM E258-80 [۱۴] به کار گرفته شد. مطابق با این استاندارد، گازهای احتراق گرم باید در راستای عمود بر نمونه باشد تا با استوکیومتری بودن اجزای سوخت، فرایند سوختن را کامل سازد. این روش آزمون برای مشخص کردن بازده نسبی عایق بودن گرمایی مواد فداشونده و نیز فرسایش سطحی در محیطی با جریان ثابت گاز داغ به کار برده می‌شود [۷].

بدین منظور، از نمونه‌هایی با صفحه مربع شکل و ابعاد ۱۰۱×۱۰۱×۶/۳۵ mm استفاده شد. از منبع سوخت اکسی استیلن شامل شار گرمایی ۸/۳۵ MW/m<sup>2</sup> (گرماسنج با دیواره سرد) و سرعت ۲۱۰ m/s (برای گازهای سرد واکنش نداده) استفاده شد. همچنین، مشعل مدل Victor 315 و نازل خروجی از انواع نازل‌های جوشکاری Victor نوع ۴ شماره ۷ به کار گرفته شد. دمای سطح پشتی، به وسیله سنجه NO. 28AWG از نوع ترموکوپل Chromel-Alumel معین و برای اندازه‌گیری شار گرمایی عبوری از منبع گاز داغ، از گرماسنج استفاده شد. فاصله و زاویه بین سر مشعل و سطح جلویی نمونه به ترتیب ۴۰ mm و ۹۰° است. بدین منظور، از بست طراحی شده استفاده شد. قرارگیری نمونه در برابر شعله تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که هاله‌ای سرخ از پشت نمونه دیده شود. این زمان به زمان شعله‌وری موسوم است.

از معادلات (۱) و (۲) به ترتیب سرعت سایش خطی و شاخص عایق بودن نمونه‌ها به دست می‌آید:

$$E = d/b \quad (1)$$

$$I_T = t_T/d \quad (2)$$

که E سرعت خوردگی، d ضخامت نمونه بر حسب mm، b زمان سوختگی قسمت میانی بر حسب s، I<sub>T</sub> شاخص عایق بودن در دمای T و t<sub>T</sub> زمان رسیدن دمای سطح پشتی تا ۸۰، ۱۸۰، ۳۸۰°C بر حسب ثانیه است.

جدول ۶- مقایسه استحکام برشی بین لایه‌ای کامپوزیت‌های کربن- فنولی.

نوع کامپوزیت	حداکثر نیروی مشاهده شده (N)	مساحت سطح مقطع نمونه (mm <sup>2</sup> )	استحکام برشی ظاهری (MPa)
C/P	۱۸۸۷	۱۰۶/۰۱	۱۳/۳۵
C/P/PVB	۲۲۵۷	۱۱۲/۱۱	۱۵/۱۰
C/P/PTSA	۱۲۲۵	۹۴/۹۰	۹/۷۰

می‌توان به کم بودن pH مخلوط رزین و اسید نسبت داد. این موضوع منجر به محبوس شدن بخار آب و فرمالدهید آزاد شده، ناشی از واکنش گرمای بین کاتالیزور اسیدی و متیل اتر حین فرایند پخت، درون کامپوزیت شده است [۱۷].

از نمودار شکل ۴ می‌توان نتیجه گرفت، درصد تخلخل رابطه مستقیمی با سرعت فرسایش خطی دارد. علت بیشتر بودن سرعت سایش نمونه‌های C/P، با وجود کم بودن درصد تخلخل آنها بحث استحکام پیوند لایه‌ها و همچنین رسانندگی گرمایی است که در نمونه‌های حاوی PVB این مسئله بهبود یافته است. همچنین مشخص است، با وجود اینکه افزودن PTSA، به دلیل افزایش چشمگیر درصد تخلخل، اثر مثبتی بر سرعت سایش خطی نداشته است، اما سرعت سایش وزنی کاهش یافته است.

#### استحکام برشی بین لایه‌ای

در جدول ۶، استحکام برشی بین لایه‌ای نمونه‌های کامپوزیتی آزمایش شده با آزمون برش تیر کوتاه آمده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، استحکام برشی نمونه‌های کامپوزیتی حاوی ۲۰ wt% ماده

جدول ۷- مقایسه دو عامل معین‌کننده مقاومت به سایش کامپوزیت‌ها.

سرعت سایش وزنی (g/s)		سرعت سایش خطی (mm/s)		نوع کامپوزیت
اکسی استیلن	پلازما	اکسی استیلن	پلازما	
۰/۱۶۱۵	۰/۱۴۴۴	۰/۱۱۹۸	۰/۱۰۱۹	C/P
۰/۱۱۸۵	۰/۱۱۸۵	۰/۰۹۳۶	۰/۰۸۶۶	C/P/PVB
۰/۲۰۹۴	۰/۰۹۹۴	۰/۱۲۵۱	۰/۱۱۰۸	C/P/PTSA
۰/۲۱۶۱	۰/۰۹۲۷	۰/۱۱۲۲	۰/۱۴۰۸	C/P/PVB/PTSA

جدول ۵- خواص فیزیکی نمونه‌های کامپوزیتی پس از ساخت.

نوع کامپوزیت	وزن (g)	ضخامت (mm)	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	تخلخل (%)
C/P	۱۰۶/۵۶	۸/۰۵	۱/۴۳	۳/۷۴
C/P/PVB	۱۱۵/۴۷	۹/۰۳	۱/۳۰	۵/۰۲
C/P/PTSA	۸۸/۶۷	۷/۷۰	۱/۱۱	۹/۱۰
C/P/PVB/PTSA	۹۳/۴۲	۸/۲۴	۱/۱۵	۹/۲۶

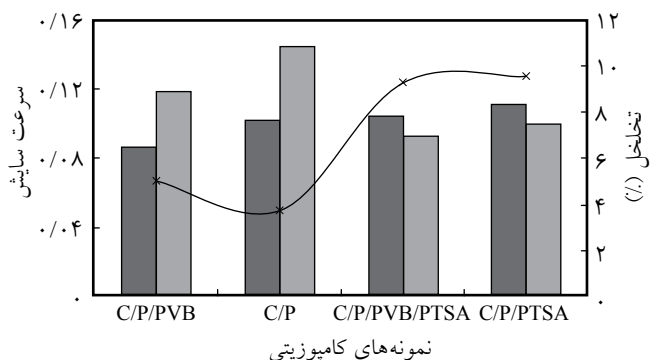
$$F^{sbs} = 0.75 \times \frac{P_m}{b \times h} \quad (۳)$$

که  $F^{sbs}$  استحکام برشی یا استحکام تیر کوتاه،  $P_m$  حداکثر نیروی مشاهده شده حین آزمون،  $b$  عرض نمونه و  $h$  ضخامت نمونه است.

## نتایج و بحث

### خواص فیزیکی

در جدول ۵، خواص فیزیکی نمونه‌های کامپوزیتی پس از ساخت آمده است. همان‌طور که مشخص است، نمونه‌های پخت شده با پاراتولون سولفونیک اسید از درصد تخلخل بیشتر نسبت به سایر نمونه‌ها برخوردارند. این مقدار برای نمونه‌های C/P/PVB/PTSA، ۵۹/۶٪ بیشتر از کامپوزیت‌های C/P است. همچنین در میان این کامپوزیت‌ها، چگالی و درصد تخلخل کامپوزیت‌های C/P ساخته شده به روش اتوکلاو بیشتر از سایر نمونه‌هاست. علت متخلخل شدن ساختار کامپوزیت‌های پخت شده با پاراتولون سولفونیک اسید را



شکل ۴- نمودار درصد تخلخل و سرعت سایش خطی و وزنی نمونه‌های کامپوزیتی: (x) درصد تخلخل، (□) سرعت سایش وزنی (g/s) و (■) سرعت سایش خطی (mm/s).



جدول ۸- مقایسه درصد افزایش و کاهش عوامل اصلی در آزمون فداشوندگی نمونه‌های کامپوزیتی با دو مشعل پلاسما و اکسی استیلن.

درصد افزایش سرعت سایش*		نمونه
وزنی (g/s)	خطی (mm/s)	
۱۱	۱۵	C/P
۰	۷	C/P/PVB
۵۲	۱۱	C/P/PTSA
۵۷	۷	C/P/PVB/PTSA

\* از مشعل پلاسما به اکسی استیلن.

در آزمون با مشعل پلاسما، به ترتیب ۱۵ و ۲۰٪ و در آزمون با مشعل اکسی استیلن به ترتیب ۱۶ و ۶۲٪ کمتر از کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف تک‌جهتی است. از این مطلب می‌توان دریافت، کاهش استحکام مکانیکی کامپوزیت‌های کربن- فنولی، اثر بسزایی بر مقاومت فداشوندگی این دسته از کامپوزیت‌ها داشته است.

جدول ۸، مقدار افزایش و کاهش عوامل مربوط به کامپوزیت‌های آزمایش شده به کمک دو مشعل بر حسب درصد را برای مقایسه

پلی‌وینیل بوتیرال، حدود ۱۲٪ بیشتر از نمونه کامپوزیتی C/P است. این افزایش استحکام به دلیل بهبود شرایط اتصال بین زمینه فنولی و الیاف کربن است و نشان می‌دهد که افزودن PVB باعث افزایش استحکام برشی و چسبندگی لایه‌ها در راستای ضخامت این نوع از کامپوزیت‌ها می‌شود.

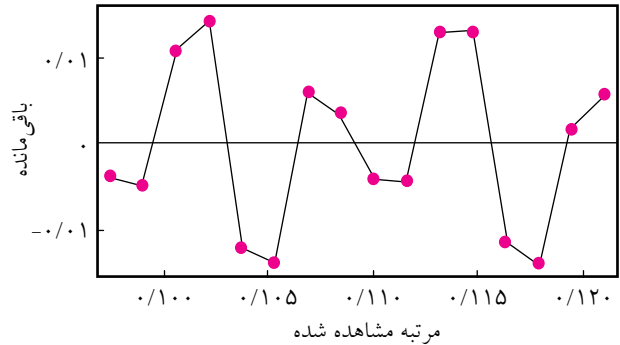
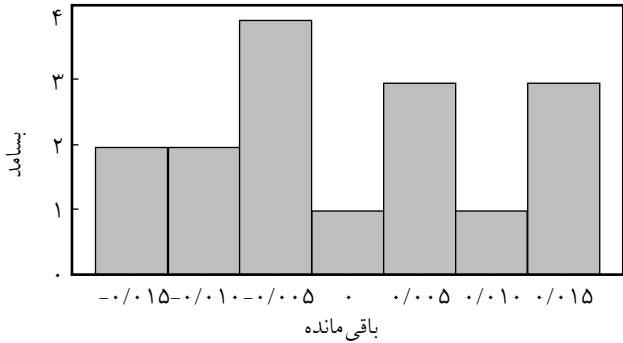
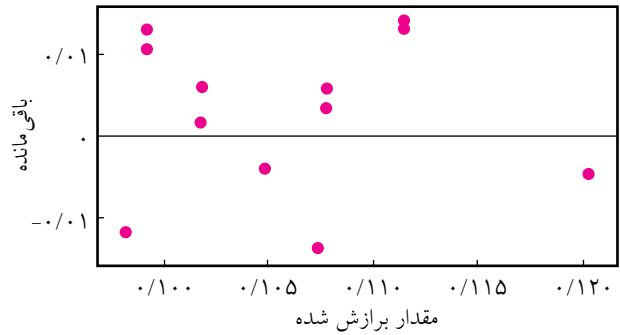
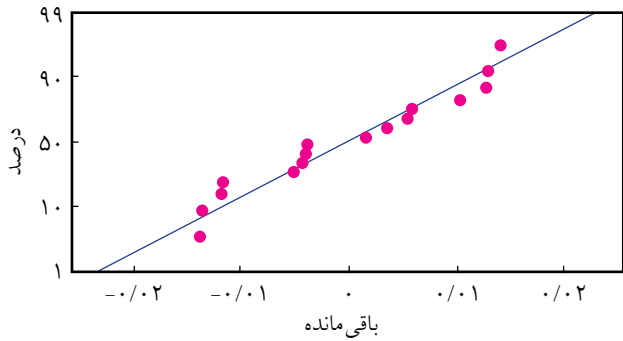
### نتایج آزمون فداشوندگی

جدول ۷ نتایج حاصل از آزمون فداشوندگی گرمایی را با مشعل پلاسما و مشعل اکسی استیلن روی این چهار دسته از نمونه‌های کامپوزیتی نشان می‌دهد. در این جدول، مقدار مقاومت گرمایی و سایشی نمونه‌های کامپوزیتی با دو عامل سرعت سایش خطی (mm/s) و سرعت سایش وزنی (g/s) مشخص شده است. سرعت سایش از تقسیم ضخامت نمونه بر مدت زمان سپری شده تا مشاهده حلقه قرمز در پشت نمونه به دست می‌آید. مهم‌ترین عامل در بررسی نحوه عملکرد محافظ‌های گرمایی فداشونده است.

با توجه به جدول ۸ می‌توان دریافت، سرعت سایش خطی و وزنی کامپوزیت‌های زمینه رزول تقویت شده با پارچه‌های کربن

جدول ۹- سرعت سایش وزنی و سایش خطی نمونه‌ها در برابر مشعل پلاسما و اکسی استیلن.

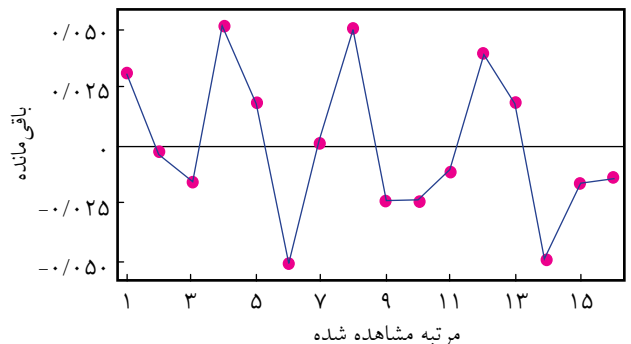
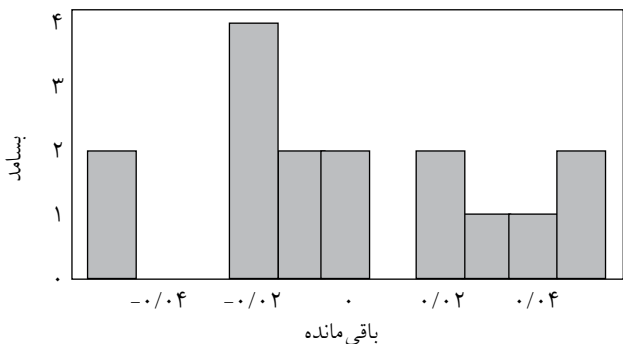
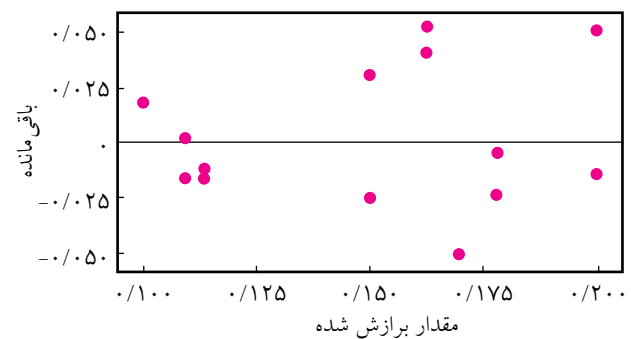
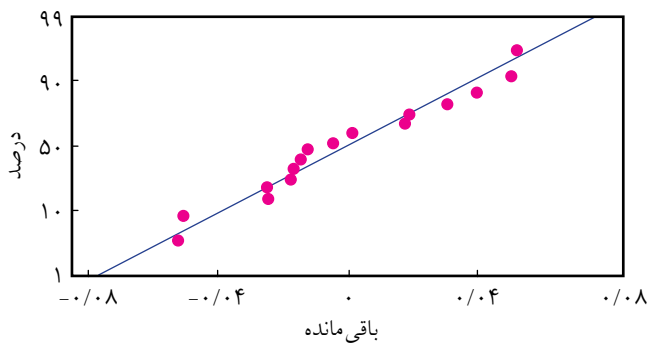
StdOrder	RunOrder	Blocks	PtType	سرعت سایش خطی (mm/s)	سرعت سایش وزنی (g/s)	نوع شعله	نوع نمونه
۱	۱	۱	۱	۰/۱۰۱۰	۰/۱۸۰۶	پلاسما	C/P
۲	۲	۱	۱	۰/۱۱۵۵	۰/۱۷۴۳	اکسی استیلن	C/P
۳	۳	۱	۱	۰/۱۰۹۷	۰/۰۹۷۲	پلاسما	C/P/PTSA
۴	۴	۱	۱	۰/۱۲۵۶	۰/۲۱۵۴	اکسی استیلن	C/P/PTSA
۵	۵	۱	۱	۰/۰۸۶۴	۰/۱۱۷۸	پلاسما	C/P/PVB
۶	۶	۱	۱	۰/۰۹۳۸	۰/۱۱۷۸	اکسی استیلن	C/P/PVB
۷	۷	۱	۱	۰/۱۰۷۹	۰/۱۱۱۰	پلاسما	C/P/PTSA/PVB
۸	۸	۱	۱	۰/۱۱۱۳	۰/۲۵۰۷	اکسی استیلن	C/P/PTSA/PVB
۹	۹	۱	۱	۰/۱۰۰۹	۰/۱۲۵۴	پلاسما	C/P
۱۰	۱۰	۱	۱	۰/۱۱۶۱	۰/۱۵۳۹	اکسی استیلن	C/P
۱۱	۱۱	۱	۱	۰/۱۱۲۰	۰/۱۰۱۸	پلاسما	C/P/PTSA
۱۲	۱۲	۱	۱	۰/۱۲۴۶	۰/۲۰۳۵	اکسی استیلن	C/P/PTSA
۱۳	۱۳	۱	۱	۰/۰۸۶۸	۰/۱۱۹۳	پلاسما	C/P/PVB
۱۴	۱۴	۱	۱	۰/۰۹۳۵	۰/۱۱۹۳	اکسی استیلن	C/P/PVB
۱۵	۱۵	۱	۱	۰/۱۰۳۶	۰/۰۹۲۶	پلاسما	C/P/PTSA/PVB
۱۶	۱۶	۱	۱	۰/۱۱۳۴	۰/۱۸۵۸	اکسی استیلن	C/P/PTSA/PVB



شکل ۵- نمودارهای چهارگانه آزمون رویه پاسخ سرعت سایش خطی.

- پلاسمای به دو دلیل عمده زیر است:
- ۱- افزایش پدیده تخریب گرمایشیایی به دلیل وجود عامل اکسند
  - ۲- بیشتر بودن ۳۳٪ فاصله سطح جلویی نازل از سطح نمونه‌ها

نشان می‌دهد. با توجه به نتایج این جدول، سرعت سایش خطی برای کامپوزیت‌های C/P تحت مشعل اکسی‌استیلن، ۱۵٪ بیشتر از مقدار مشابه در آزمایش با مشعل پلاسماست. این افزایش سرعت سایش در مشعل اکسی‌استیلن با وجود بیشتر بودن شار گرمایی شعله در مشعل



شکل ۶- نمودارهای چهارگانه آزمون رویه پاسخ سرعت سایش وزنی.

جدول ۱۰- تحلیل واریانس (تمام عوامل مؤثر در نظر گرفته شده‌اند).

تحلیل واریانس برای سرعت سایش خطی					
P	F	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	منبع
۰/۳۰۱	۱/۳۹	۰/۰۰۰۱۸۲	۰/۰۰۰۷۲۸	۴	رگرسیون
۰/۲۹۵	۱/۳۷	۰/۰۰۰۱۷۹	۰/۰۰۰۵۹۰	۲	درجه یک
۰/۳۴۹	۰/۹۶	۰/۰۰۰۱۲۶	۰/۰۰۰۱۳۳	۱	C1 (نوع نمونه)
۰/۲۱۰	۱/۷۷	۰/۰۰۰۲۳۳	۰/۰۰۰۴۵۷	۱	C2 (نوع مشعل)
۰/۴۳۳	۰/۶۶	۰/۰۰۰۰۸۷	۰/۰۰۰۰۸۷	۱	درجه دو
۰/۴۳۳	۰/۶۶	۰/۰۰۰۰۸۷	۰/۰۰۰۰۸۷	۱	C1*C1
۰/۵۴۵	۰/۳۹	۰/۰۰۰۰۵۱	۰/۰۰۰۰۵۱	۱	تعامل اثر
۰/۵۴۵	۰/۳۹	۰/۰۰۰۰۵۱	۰/۰۰۰۰۵۱	-	C1*C2
-	-	۰/۰۰۰۱۳۱	۰/۰۰۱۴۴۳	۱۱	خطای باقی مانده
۰/۰۰۰	۲۵۵/۴۳	۰/۰۰۰۴۷۶	۰/۰۰۱۴۲۸	۳	نقض برازش
-	-	۰/۰۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۱۵	۸	خطای خالص
-	-	-	۰/۰۰۲۱۷۱	۱۵	جمع
تحلیل واریانس برای سرعت سایش وزنی					
P	F	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	منبع
۰/۰۵۸	۳/۱۷	۰/۰۰۴۶۲۵	۰/۰۱۸۴۹۹	۴	رگرسیون
۰/۴۸۱	۰/۷۸	۰/۰۰۱۱۴۰	۰/۰۰۲۲۸۰	۲	درجه یک
۰/۲۴۱	۱/۵۴	۰/۰۰۲۲۳۹	۰/۰۰۰۱۹۸	۱	C1 (نوع نمونه)
۰/۸۷۰	۰/۰۳	۰/۰۰۰۰۴۱	۰/۰۱۴۱۰۲	۱	C2 (نوع مشعل)
۰/۲۵۸	۱/۴۲	۰/۰۰۲۰۷۵	۰/۰۰۲۰۷۵	۱	درجه دو
۰/۲۵۸	۱/۴۲	۰/۰۰۲۰۷۵	۰/۰۰۲۰۷۵	۱	C1*C1
۰/۲۵۳	۱/۴۶	۰/۰۰۲۱۲۴	۰/۰۰۲۱۲۴	۱	تعامل اثر
۰/۲۵۳	۱/۴۶	۰/۰۰۲۱۲۴	۰/۰۰۲۱۲۴	۱	C1*C2
-	-	۰/۰۰۱۴۵۷	۰/۰۱۶۰۲۵	۱۱	خطای باقی مانده
۰/۰۰۹	۷/۷۸	۰/۰۰۳۹۷۸	۰/۰۱۱۹۳۵	۳	نقض برازش
-	-	۰/۰۰۰۰۵۱۱	۰/۰۰۰۴۰۹۱	۸	خطای خالص
-	-	-	۰/۰۳۴۵۲۴	۱۵	جمع

اکسی استیلن بر نمونه‌های ساخته شده بررسی شود. بدین منظور با استفاده از نمودارهای صفحه‌ای، سرعت سایش خطی و وزنی نمونه‌های بررسی شده در این پژوهش، مطالعه شدند.

تحلیل واریانس رویه پاسخ، ترکیبی از روش‌های آماری و ریاضی است که برای گسترش، اصلاح و بهینه‌سازی فرایندها به کار گرفته می‌شود. در واقع، از این روش برای مشخص کردن اثر چند متغیر

در آزمون مشعل پلاسما (۳۰ mm) نسبت به آزمون مشعل اکسی استیلن (۲۰ mm).

### تحلیل آماری عوامل

در این پژوهش سعی شده است، با استفاده از تحلیل واریانس رویه پاسخ به کمک نرم‌افزار Minitab، اثر شعله‌های پلاسما و نیز

جدول ۱۱- تحلیل واریانس (با در نظر گرفتن حذف عوامل غیر مؤثر).

تحلیل واریانس برای سرعت سایش خطی					
منبع	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F	P
رگرسیون	۲	۰/۰۰۰۵۹۰	۰/۰۰۰۲۹۵	۲/۴۳	۰/۱۲۷
درجه یک	۲	۰/۰۰۰۵۹۰	۰/۰۰۰۲۹۵	۲/۴۳	۰/۱۲۷
C1 (نوع نمونه)	۱	۰/۰۰۰۱۳۳	۰/۰۰۰۱۳۳	۱/۱۰	۰/۳۱۴
C2 (نوع مشعل)	۱	۰/۰۰۰۴۵۷	۰/۰۰۰۴۵۷	۳/۷۶	۰/۰۷۵
خطای باقی مانده	۱۳	۰/۰۰۱۵۸۱	۰/۰۰۰۱۲۲	-	-
نقص برازش	۵	۰/۰۰۱۵۶۶	۰/۰۰۰۳۱۳	۱۶۸/۰۷	۰/۰۰۰
خطای خالص	۸	۰/۰۰۰۰۱۵	۰/۰۰۰۰۰۲	-	-
جمع	۱۵	۰/۰۰۲۱۷۱	-	-	-
تحلیل واریانس برای سرعت سایش وزنی					
منبع	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F	P
رگرسیون	۲	۰/۰۱۴۳۰۰	۰/۰۰۷۱۵۰	۴/۶۰	۰/۰۳۱
درجه یک	۲	۰/۰۱۴۳۰۰	۰/۰۰۷۱۵۰	۴/۶۰	۰/۰۳۱
C1 (نوع نمونه)	۱	۰/۰۰۰۱۹۸	۰/۰۰۰۱۹۸	۰/۱۳	۰/۷۲۷
C2 (نوع مشعل)	۱	۰/۰۱۴۱۰۲	۰/۰۱۴۱۰۲	۹/۰۶	۰/۰۱۰
خطای باقی مانده	۱۳	۰/۰۲۰۲۲۴	۰/۰۰۱۵۵۶	-	-
نقص برازش	۵	۰/۰۱۶۱۳۳	۰/۰۰۳۲۲۷	۶/۳۱	۰/۰۱۲
خطای خالص	۸	۰/۰۰۴۰۹۱	۰/۰۰۰۰۵۱۱	-	-
جمع	۱۵	۰/۰۳۴۵۲۴	-	-	-

نمونه دارای ۴ سطح و عامل نوع شعله دارای دو سطح پلازما و اکسی‌استیلن است. برای هر سطح آزمایش ۲ مرتبه تکرار در نظر گرفته شد.

بررسی نمودارهای چهارگانه که در شکل‌های ۵ و ۶ برای سرعت سایش خطی و وزنی آورده شده است، صحت و دقت تحلیل را تبیین می‌کند. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، با توجه به اینکه داده‌های به دست آمده از آزمون، در اطراف خط نرمال قرار گرفته‌اند، صحت تحلیل انجام شده تأیید می‌شود. در ابتدای تحلیل، تمام جملات درجه یک، درجه دو و نیز تعامل اثر پارامترها، مؤثر در نظر گرفته شد. نتایج به دست آمده از تحلیل واریانس در جدول ۱۰ آمده است.

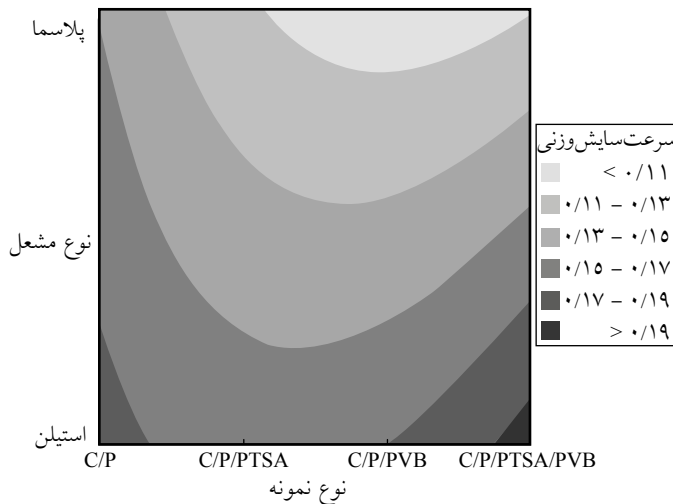
با توجه به جدول ۱۰ و مقادیر P مشاهده می‌شود، هیچ‌یک از عوامل نوع نمونه و نوع مشعل و نیز درجه دو و تعامل اثر آنها مؤثر نیست. همان‌طور که در جدول ۱۰ مشاهده می‌شود، با حذف عوامل

روی یک یا چند کمیت مشخص استفاده می‌شود. در این روش، کمیت مدنظر به وسیله یک مدل درجه دو تقریب زده می‌شود. به عنوان نمونه، اگر کمیت  $y$  وابسته به دو متغیر  $x_1$  و  $x_2$  باشد،  $y$  به شکل معادله (۴) فرمول می‌شود که به آن معادله رگرسیون گفته می‌شود:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2 \quad (4)$$

مؤثر بودن عامل مدنظر به وسیله مقدار P محاسبه شده برای هر عامل مشخص می‌شود. برای اینکه متغیر مؤثر باشد، کوچک بودن مقدار P ضروری است. اگر یک متغیر روی کمیت مورد بررسی مؤثر نباشد، می‌توان با حذف آن از محاسبات، مدل را بهینه کرد.

در جدول ۹، سطح‌های هر پارامتر در تحلیل آماری و همچنین مقدار سرعت سایش وزنی و سایش خطی برای هر چیدمان آزمایش آمده است. برای بررسی اثر نوع شعله بر مقدار سرعت سایش خطی و وزنی، از دو عامل نوع نمونه و نوع شعله استفاده شد که عامل نوع



شکل ۸- نمودار دوبعدی سرعت سایش وزنی نمونه‌ها در برابر مشعل پلازما و اکسی استیلن.

### نتیجه گیری

از نتایج و تحلیل‌های گفته شده می‌توان این‌گونه برداشت کرد که ویژگی‌های فداشوندگی کامپوزیت‌های کربن - فنولی به شدت به چگالی کامپوزیت وابسته است. افزایش چگالی و کاهش مقدار تخلخل در کامپوزیت‌های کربن - فنولی باعث افزایش بازده فداشونده می‌شود. با توجه به سازوکار سایش کامپوزیت با شعله در فرایند زغال‌شونده این‌طور برمی‌آید که وجود پلی‌وینیل بوتیرال رزین به عنوان افزودنی مناسب باعث افزایش چقرمگی ساختار کامپوزیت شده است. این افزایش چقرمگی باعث کاهش اثرهای گرمای گراممکانیکی و در نتیجه کمتر شدن سرعت سایش شده است. همچنین، با وجود اینکه افزودن PTSA به عنوان عامل پخت‌کننده مراحل فرایند تولید نمونه‌ها را تسهیل می‌کند، ولی برخلاف انتظار، نمونه‌های کامپوزیتی تولید شده به دلیل داشتن ساختاری متخلخل نسبت به سایر نمونه‌ها بازده فداشوندگی مناسبی ندارد.

### مراجع

1. D'Aleio G.F. and Parker J.A., *Ablative Plastics*, Marcel Dekker, New York, 1971.
2. Donghwan C. and Yung B., Microstructural Interpretation of the Effect of Various Matrices on the Ablation Properties of Carbon-fiber-reinforced Composites, *Compos. Sci. Tehnol.*, **61**, 271-280, 2001.
3. Park J.K., Cho D., and Kang T.J., A Comparison of the Interfa-
- cial, Thermal, and Ablative Properties Between Spun and Filament Yarn Type Carbon Fabric/Phenolic Composites, *Carbon*, **42**, 795-804, 2004.
4. Pasbakhsh P., Zamani J., and Shokuhfar A., The Effect of Various Reinforcements on the Ablation, Thermal and Microstructural Properties of Phenolic Matrix Composite, *Key Eng. Mater.* **384-385**, 57-60, 2007.

5. Lee S.M., *International Encyclopedia of Composites*, **1**, VCH, New York, 1990.
6. Bahramian A.R., Kokabi M., Navid Famili M.H., and Beheshty M.H., Ablation and Thermal Degradation Behaviour of a Composite Based on Resol Type Phenolic Resin: Process Modeling and Experimental, *Polymer*, **47**, 3661-3673, 2006.
7. Lee Y.J. and Joo H.J., Ablation Characteristics of Carbon Fiber Reinforced Carbon (CFRC) Composites in the Presence of Silicon Carbide (SiC) Coating, *Surface Coat. Technol.*, **180-181**, 286-289, 2004.
8. Lee Y.J. and Joo H.J., Investigation on Ablation Behavior of CFRC Composites Prepared at Different Pressure, *Composite: Part A*, **35**, 1285-1290, 2004.
9. Kang T.J., Shin S.J., Jung K., and Park J.K., Mechanical, Thermal and Ablation Properties of Interply Continuous/Spun Hybrid Carbon Composites, *Carbon*, **44**, 833-839, 2006.
10. Patton R.D., Pittman Jr. C.U., Wang L., Hill J.R., and Day A., Ablation, Mechanical and Thermal Conductivity Properties of Vapor Grown Carbon Fiber/Phenolic Matrix Composites, *Composites: Part A*, **33**, 243-250, 2002.
11. Gupta L., *Advanced Composite Materials*, Himalaya, 2009.
12. <http://www.gayatrionline.com/p-toluene-sulfonic-acid.html>, available in 10 June 2010.
13. Standard Test Method for Density of Plastics by the Density-Gradient Technique, ASTM D 1505-03.
14. Standard Test Method for Oxyacetylene Ablation Testing of Thermal Insulation Materials, ASTM E 285-80.
15. Mazumdar S.K., *Composite Manufacturing: Materials, Products and Process Engineering*, CRC, 2000.
16. Yin J., Xiong X., Zhang H., and Huang B., Microstructure and Ablation Performances of Dual-Matrix Carbon/Carbon Composites, *Carbon*, **44**, 1690-1694, 2006.
17. Beheshti M.H., *Phenolic Resins*, Iran Polymer Society, Tehran, 2007.
18. Mirzapour M., Rezaei Haghighat H., and Eslami Z., Study on Ablation Behavior of Phenolic Composites Prepared with Different Amounts of Zirconia and Asbestos Fiber, *Iran. J. Polymer Sci. Technol. (In Persian)*, **25**, 181-191, 2012.