

## Study on Properties and Performance of Cotton/Epoxy Composites Inhibitor

V. Shahedifar<sup>1</sup>, E. Amiri<sup>1</sup>, A.M. Rezadoust<sup>\*2</sup>, and M. Haji Hosseini<sup>1</sup>

1. Composite Materials and Technology Center, Malek Ashtar University of Technology,  
P.O. Box: 15875-1774, Tehran, Iran

2. Iran Polymer and Petrochemical Institute, P.O. Box: 14965-115, Tehran, Iran

Received 9 September 2009, accepted 14 August 2010

### ABSTRACT

Inhibitory effect of double-base solid propellants is exerted to control and prevent the burning degree of the exposed area which is due to longer burning time. In this research a composite inhibitor based on cotton fibers/epoxy resin was manufactured by filament winding technique. Some flame retardant materials such as antimony trioxide and tetrachlorophthalic anhydride were employed as the components of an inhibitor to control the burning process. A desirable viscosity of an epoxy resin should idealistic increase the wettability of fibers and create stronger adhesion to the propellant surface, as low density cotton fibers show high fracture strain. Some samples of composite inhibitors have been produced according to ASTM standards and their mechanical and thermal properties have been studied by several tests such as tensile and adhesive tests, thermogravimetric analysis, differential scanning calorimetry, thermomechanical analysis and flame retardancy. Finally the inhibited propellant charge, statically fired at ambient temperature, was found to display a smooth and flat pressure-time profile which confirmed the successful performance of cotton/epoxy composite inhibition system without the application of any coating barrier. Also, it is evident that the burning time is increased as well.

#### Key Words:

propellant inhibitor,  
cotton/epoxy composite,  
flame retardant,  
residual char,  
thermogravimetry analysis

(\*)To whom correspondence should be addressed.

E-mail: [a.rezadoust@ippi.ac.ir](mailto:a.rezadoust@ippi.ac.ir)

## مطالعه خواص و عملکرد عایق کامپوزیتی بر پایه رزین اپوکسی - الیاف پنبه

وحیده شاهدی فرا<sup>۱</sup>، ایرج امیری امرایی<sup>۱</sup>، امیر مسعود رضادوست<sup>۲\*</sup>، مریم حاجی حسینی<sup>۱</sup>

۱ - تهران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، گروه کامپوزیت، صندوق پستی ۱۷۷۴-۱۵۸۷۵

۲ - تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، صندوق پستی ۱۱۵-۱۴۹۶۵

دریافت: ۸۸/۶/۱۸، پذیرش: ۸۹/۵/۲۳

### چکیده

عایق کاری پیش‌رانه‌های جامد برای کنترل و بازدارندگی سطح سوزش و در نتیجه افزایش زمان احتراق انجام می‌گیرد. در این پژوهش، ویژگی‌ها و عملکرد عایق کامپوزیتی بر پایه رزین اپوکسی و تقویت‌کننده الیاف پنبه بررسی شده است. بدین منظور، پیش‌رانه جامد دوپایه با کامپوزیت موردنظر به روش رشته‌پیچی عایق کاری شد. در ترکیب آن نیز به منظور کنترل فرایند سوزش، مواد کندسوزکننده آنتیموان اکسید و تتراکلروفتالیک انیدرید افزوده شد. رزین اپوکسی با گرانیوی مناسب، آغشته‌پذیری الیاف را به خوبی امکان‌پذیر ساخت و چسبندگی لازم را به سطح پیش‌رانه فراهم کرد. الیاف پنبه نیز با چگالی کم، انعطاف‌پذیری و ازدیاد طول مناسبی از خود نشان داد. عایق کامپوزیتی اپوکسی - پنبه برای مطالعه خواص، مورد آزمون‌های تعیین خواص مکانیکی و گرمایی مانند آزمون کشش، چسبندگی، گرماوزن‌سنجی، گرماسنجی پویشی تفاضلی، تعیین سرعت سوزش و آزمون گرمامکانیکی قرار گرفت. برای بررسی عملکرد آن نیز آزمون موتور ایستا انجام شد. نتایج نشان می‌دهد، عایق طراحی شده چسبندگی قوی با سطح پیش‌رانه دارد و ضریب انبساط گرمایی هر دو جزء عایق و پیش‌رانه مطابقت خوبی با یکدیگر دارند. در منحنی فشار - زمان حاصل از آزمون موتور ایستا نیز مشاهده شد که تغییر ناگهانی در شیب روی نداده و افزایش یا کاهش فشار به وجود نیامده است. این مسئله مؤید عملکرد صحیح عایق یادشده است. هم‌چنین، مشخص شد که زمان سوزش پیش‌رانه نیز افزایش یافته است.

### واژه‌های کلیدی

عایق پیش‌رانه،  
کامپوزیت اپوکسی - پنبه،  
مواد کندسوزکننده،  
زغال باقی‌مانده،  
تجزیه گرماوزن‌سنجی

\* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

[a.rezadoust@ippi.ac.ir](mailto:a.rezadoust@ippi.ac.ir)

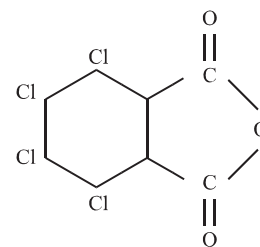
## مقدمه

اشکال مختلف پیش‌رانه زمانی که در موتور موشک قرار می‌گیرند، نیازمند استفاده از مواد خنثی روی سطح خارجی هستند تا از الگوی مناسب سوزش اطمینان حاصل شده و از تمایل پیش‌رانه برای سوزش سطوح خارجی کم شود. این مواد خنثی عایق نامیده می‌شوند که در مدت زمان سوزش به آسانی نمی‌سوزند [۱].

عایق پیش‌رانه باید خواص فیزیکی مناسب مانند چگالی کم، دمای نرم شدن بالا و مواد فرار کم و نیز اتصال قوی با پیش‌رانه داشته باشد. افزون بر آن، عایق به کار رفته باید دارای شاخص‌های فداشوندگی و گرمایی مناسب نیز باشد، مانند گرمای مؤثر فداشوندگی زیاد، شاخص عایق و دمای شروع تخریب بالا، قابلیت تشکیل زغال پایدار و سرعت پس‌روی سطح یکنواخت و کم. پس‌روی سطح غیریکنواخت و نامطلوب اغلب معادله‌های پیش‌بینی شده آیرودینامیکی را برهم می‌زند و در نتیجه پرتابه مشخصات مد نظر را نخواهد داشت. هم‌چنین، ضریب انبساط گرمایی عایق تا آن جا که ممکن است، باید مشابه با پیش‌رانه باشد تا اختلالی در عملکرد آن ایجاد نشود [۲، ۱].

در ترکیب عایق پیش‌رانه برای دست‌یابی به خواص گرمایی مناسب، مانند کاهش سرعت سوزش و افزایش زغال‌گذاری مواد کندسوزکننده به کار برده می‌شوند. این مواد با ساز و کارهای مختلفی روی سرعت سوزش اثر می‌گذارند [۳، ۴]. در این پژوهش، از یک ترکیب کلردار به نام تتراکلروفتالیک انیدرید با فرمول شیمیایی  $C_8Cl_4O_3$  برای کندسوزکنندگی عایق استفاده شده است. ساختار این ماده در شکل ۱ آمده است [۵].

در ابتدا از موادی مانند آزبست، نوارهای عایق الکتریکی و رزین فنول - فرمالدهید با تقویت‌کننده پارچه‌ای برای عایق کاری پیش‌رانه‌های جامد دوپایه استفاده می‌شد، اما هیچ‌کدام عملکرد موفقیت‌آمیزی در انبارداری و تحمل چرخه‌های دمایی نداشتند. همین مسئله انگیزه‌ای شد تا از مشتقات سلولوزی مانند استات سلولوز و اتیل سلولوز که چسبندگی قوی با پیش‌رانه‌های دوپایه دارند، استفاده شود. البته استات سلولوز جذب نیتروگلیسیرین زیادی دارد که منجر به شکسته شدن اتصال آن با



شکل ۱ - ساختار شیمیایی کندسوزکننده تتراکلروفتالیک انیدرید [۵].

پیش‌رانه و در نتیجه تغییر عملکرد بالستیکی می‌شود. بنابراین، عایق‌های یاد شده همراه با پوشش نفوذناپذیر به کار می‌روند. اتیل سلولوز نیز که به طور گسترده در پیش‌رانه‌های شعاعی سوز استفاده می‌شود، به دلیل پایین بودن دمای نرم شدن آن، برای پیش‌رانه‌های سیگارسوز (cigarette burning) مناسب نیست [۶].

گروور و همکاران در پژوهش خود، با تهیه کوپلیمر پیوندی اتیل سلولوز - متیل متاکریلات این مشکل را برطرف کرده و آن را برای عایق کاری پیش‌رانه‌های سیگارسوز نیز مطلوب ساخته‌اند [۶].

افزون بر مشتقات سلولوزی، برخی پلی‌استرهای هالوژن‌دار انعطاف‌پذیر دارای پیوندهای عرضی که قابلیت جذب نیتروگلیسیرین متوسط دارند، به عنوان عایق پیش‌رانه‌های دوپایه استفاده می‌شوند [۹-۶]. در این زمینه Agrawal و همکاران استفاده از پلی‌استر سیرنشده کلردار را تأیید کرده‌اند [۱۰]. Ji-ping و همکاران نیز به کارگیری رزین پلی‌استر سیرنشده را به همراه آستر ویژه‌ای به عنوان عایق پیش‌رانه جامد مطالعه کرده‌اند [۱۱].

هم‌چنین، گاهی مواد الاستومری پر شده نیز بدین منظور استفاده می‌شوند، مانند پلی‌یورتان با پرکننده پلی‌سیلوکسان که Yu و همکاران در پژوهش خود آن را بررسی کرده‌اند [۱۲]. البته عایق‌های یاد شده در موتورهای با پیش‌رانه دوپایه درون‌سوز (internal burning) در برابر جریان گاز داغ حاصل از احتراق، مقاومت سایشی مناسبی ندارند و معمولاً مقدار بسیار کم و ناچیزی زغال از خود باقی می‌گذارند. در نتیجه، با سرعت پس‌روی سطح زیاد زمان سوزش کمی دارند. این مواد با توجه به طراحی موتور، هنگامی که انعطاف‌پذیری بسیار زیاد مورد نیاز باشد، به کار می‌روند. از این رو، در مواردی که سایش جریانی زیاد است، یعنی سرعت گازهای خروجی زیاد است، استفاده از مواد متراکمی مانند کامپوزیت‌ها گزینه مناسبی است. شایان ذکر است، با توجه به کاربرد ویژه این نوع عایق‌ها، اطلاعات موجود در این زمینه بسیار محدود است.

در این پژوهش، خواص مکانیکی و گرمایی عایق کامپوزیتی اپوکسی - الیاف پنبه به عنوان عایق پیش‌رانه جامد دوپایه مطالعه شده و عملکرد آن در شرایط عملیاتی بررسی می‌شود.

## تجربی

### مواد

در این پژوهش، از رزین اپوکسی با نام تجاری Araldite LY 5052 و سخت‌کننده پلی‌آمین با نام Aradur HY 5052 (با نسبت وزنی ۱۰۰ به

جدول ۲ - فرمول بندی حمام آغشته سازی بدون مواد کندسوزکننده.

نوع ماده	مقدار (%)
رزین اپوکسی	۷۱
آهن (III) اکسید	۲
سخت کننده	۲۷

ماده هالوزن دار به آنتیموان (Sb:Cl) مقدار بهینه است [۱۳]. لازم به ذکر است، آهن اکسید در فرمول بندی عایق به طور عمد به عنوان رنگ دانه (عامل رنگ زا) به کار رفته است و کیفیت و چگونگی آغشته شدن الیاف با رزین را نشان می دهد.

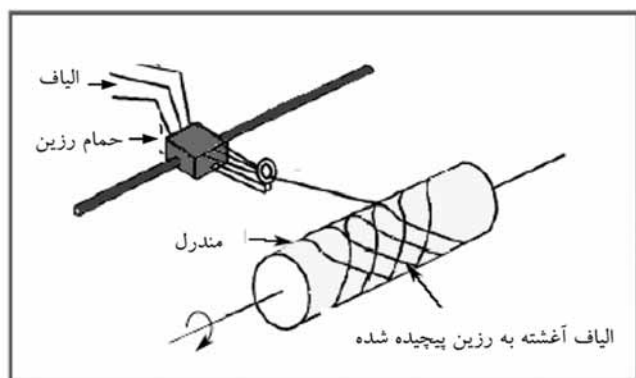
### رشته پیچی

افزودنی های مدنظر به وسیله هم زن مکانیکی با رزین اپوکسی مخلوط و سپس سخت کننده اضافه شد. پس از آماده کردن حمام آغشته سازی، الیاف پنبه به آن آغشته شده و با نیروی کشش ۲ N به دور پیش رانه با زاویه ۸۹ درجه پیچیده شدند. پس از پخت محیطی، سطح عایق در ضخامتی معین صاف و یکنواخت شد. در شکل ۲ نمایشی از فرایند رشته پیچی نشان داده شده است [۱۴].

### نتایج و بحث

#### خواص مکانیکی

نمونه های کامپوزیتی شامل ۳۰ درصد حجمی الیاف پنبه، پخت محیطی شده و زیر آزمون کشش قرار گرفتند. در شکل ۳ منحنی تنش - کرنش سه نمونه نشان داده شده است. در جدول ۳ نیز داده های حاصل از



شکل ۲ - نمایشی از فرایند رشته پیچی [۱۴].

(۳۸) محصول شرکت هانسن استفاده شد. هم چنین، الیاف سلولوزی پنبه تهیه شده از کارخانه های ساوین تاب و کندسوزکننده تتراکلروفتالیک انیدرید و آنتیموان اکسید محصول شرکت Merck آلمان استفاده شدند.

### دستگاه ها

در این پژوهش، برای بررسی خواص مکانیکی از جمله استحکام و مدول کششی و کرنش در شکست از دستگاه Instron 8502 بر اساس استاندارد ASTM D 3039 با سرعت کشش ۷۵ mm/min استفاده شد. مقدار چسبندگی عایق به پیش رانه نیز به وسیله دستگاه pull off نوع V و طبق استاندارد ASTM D4541-02 اندازه گیری شد. برای بررسی رفتار گرمایی دستگاه TGA مدل PL-1500 با سرعت گرمادهی ۱۰°C/min و دستگاه DSC مدل Pyris در محیط گاز خنثی نیتروژن به کار گرفته شد. برای اندازه گیری ضریب انبساط گرمایی نیز از استاندارد ASTM D969-03 استفاده شد. این آزمون به روش انبساط سنجی و در محدوده دمایی ۵۰- تا ۱۰۰°C انجام گرفت.

اندازه گیری سرعت گسترش شعله نیز مطابق با استاندارد ASTM D635 انجام شد. نمونه ها در ابعاد ۱۲۵×۱۳×۳ mm آماده و به شکل افقی با زاویه ۴۵° از یک انتها به وسیله گیره به پایه فلزی وصل شدند و از انتهای دیگر در فاصله های ۲۵ و ۱۰۰ mm علامت گذاری شدند و به مدت ۳۰ s در معرض شعله چراغ بنزن قرار گرفتند. در نهایت، آزمون عملیاتی موتور ایستا به عنوان آخرین مرحله برای تأیید آزمون های آزمایشگاهی در دمای محیط انجام گرفت و منحنی فشار - زمان حاصل از آن بررسی شد.

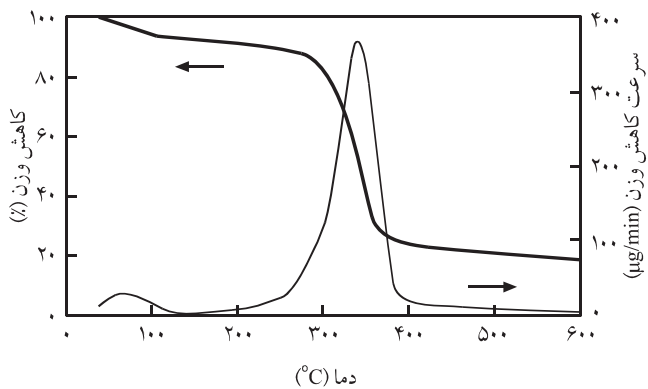
### روش ها

#### تهیه حمام آغشته سازی

در جدول های ۱ و ۲ فرمول بندی های به کار رفته برای تهیه حمام آغشته سازی درج شده است. در برخی منابع اشاره شده که نسبت ۱:۳:

جدول ۱ - فرمول بندی حمام آغشته سازی با مواد کندسوزکننده.

نوع ماده	مقدار (%)
رزین اپوکسی	۵۹
تتراکلروفتالیک انیدرید	۱۲
آنتیموان اکسید	۴
آهن (III) اکسید	۲
سخت کننده	۲۳



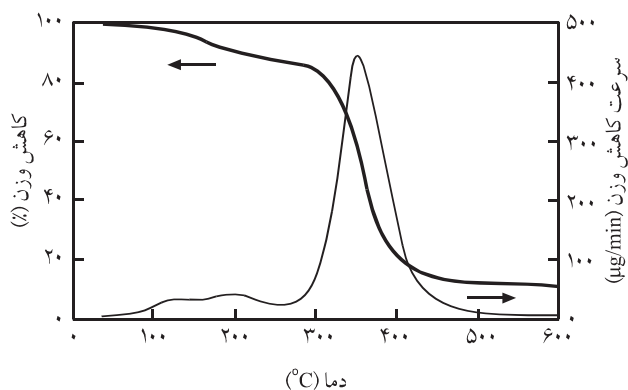
شکل ۴ - منحنی TGA و DTG الیاف پنبه.

### خواص گرمایی

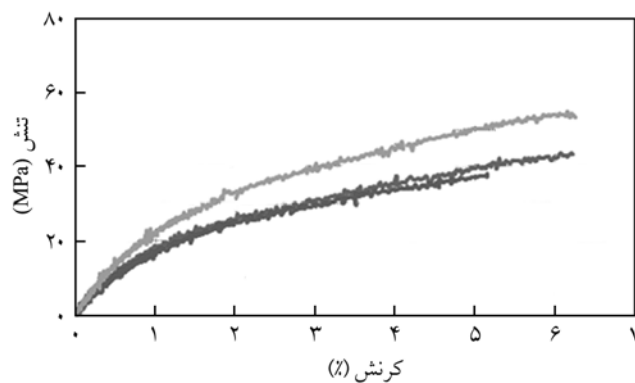
#### آزمون گرمایزنی (TGA)

همان‌طور که اشاره شد، برای بهبود خواص گرمایی مانند کاهش سرعت سوزش، افزایش دمای تخریب، افزایش زغال‌گذاری و تشکیل زغال پایدار، از مواد کندسوزکننده در ترکیب عایق کامپوزیتی اپوکسی - پنبه استفاده شد. ابتدا در شکل ۴، منحنی‌های TGA و DTG الیاف پنبه به عنوان تقویت‌کننده عایق کامپوزیتی آورده شده است. سپس، در شکل‌های ۵ و ۶ منحنی‌های TGA و DTG عایق کامپوزیتی اپوکسی - پنبه به ترتیب بدون کندسوزکننده و با وجود آن (شامل آنتیموان اکسید و تتراکلروفتالیک انیدرید) آمده است.

با توجه به شکل ۴ افت وزنی تقریباً ۸ درصدی در آغاز گرمادهی، که در دمای حدود  $70^{\circ}\text{C}$  اتفاق افتاده است، ناشی از خروج رطوبت موجود در الیاف طبیعی پنبه است. تخریب - سلولوز (به عنوان جزء اصلی پنبه) با کاهش وزن ۷۳ درصدی در دمای  $345^{\circ}\text{C}$  به بیشینه سرعت  $360 \mu\text{g}/\text{min}$



شکل ۵ - منحنی TGA و DTG کامپوزیت اپوکسی - پنبه بدون کندسوزکننده.



شکل ۳ - منحنی‌های تنش کششی - کرنش نمونه‌های اپوکسی - پنبه دارای کندسوزکننده با ۳۰ درصد حجمی الیاف.

تحلیل نرم‌افزاری با میانگین نتایج آزمون کشش مقایسه شده‌اند. از آن‌جا که عایق پیش‌ران در معرض گرما و تنش زیادی قرار دارد، شکنندگی کمتر و مقاومت کششی زیاد آن از اهمیت بسیاری برخوردار است. به طوری که اگر عایق، کرنش کافی نداشته و شکننده باشد، شکاف‌ها و ترک‌های ایجاد شده در حین اعمال فشار، باعث نفوذ شعله به فضای پشت عایق و در نتیجه از بین رفتن سریع‌تر آن و کاهش زمان سوزش پیش‌ران می‌شود.

همان‌طور که در جدول ۳ دیده می‌شود، نمونه‌های کامپوزیتی تهیه شده دارای استحکام کششی و کرنش مطلوب هستند.

اتصال عایق به سطح پیش‌ران نیز هم در زمان انبارداری و هم طی استفاده درون موتور پرتابه حایز اهمیت بسیاری است. نتیجه اندازه‌گیری استحکام چسبندگی عایق به پیش‌ران  $5/8 \text{ MPa}$  به دست آمده است. در آزمون موتور ایستا، مقدار چسبندگی عایق اپوکسی - پنبه به سطح پیش‌ران به دلیل عدم جدایش آن طی آزمون، مناسب ارزیابی شده است. لازم به ذکر است، برای افزایش چسبندگی، پیش از رشته پیچی، سطح پیش‌ران با استون چربی‌زدایی شده و یک لایه نازک از رزین (بدون الیاف) روی پیش‌ران اعمال شده است.

جدول ۳ - مقایسه داده‌های نرم‌افزاری با نتایج آزمون کشش نمونه‌های اپوکسی - پنبه دارای کندسوزکننده.

نمونه	استحکام کششی (MPa)	مدول کششی (GPa)	کرنش در نقطه شکست (%)
اپوکسی - پنبه (نتایج تجربی)	$45/6 \pm 7/8$	$2/63 \pm 0/4$	$6/27 \pm 1/1$
اپوکسی - پنبه (داده‌های نرم‌افزاری)	$42/4$	$3/12$	$4/23$

جدول ۴ - نتایج حاصل از آزمون TGA.

نوع عایق	دمای شروع تخریب (°C)	دمای پایان تخریب (°C)	افت وزنی ناشی از تخریب (%)	زغال باقی مانده در ۶۰۰°C (%)
اپوکسی - پنبه <sup>۱</sup>	۳۰۵	۴۰۲	۶۲	۹/۵
اپوکسی - پنبه <sup>۲</sup>	۲۹۰	۳۶۲	۴۳	۲۰/۳

(۱) بدون کندسوز کننده و (۲) با کندسوز کننده است.

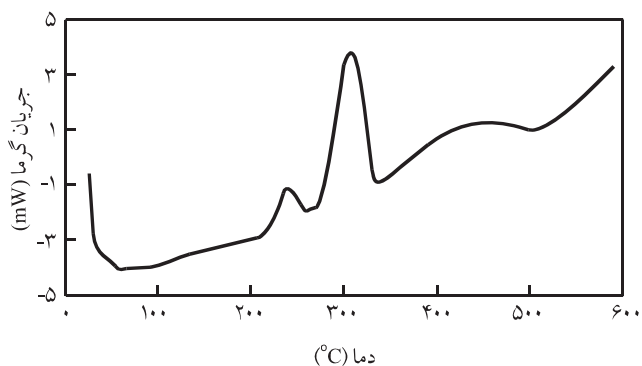
#### گرماسنجی پویشی تفاضلی (DSC)

در شکل ۷، منحنی DSC نمونه اپوکسی - پنبه دارای کندسوز کننده نشان داده شده است. منحنی های DSC به کمک منحنی های حاصل از آزمون گرما وزن سنجی (TGA) بررسی و تحلیل می شوند. واکنش گرمایی را که در دمای ۲۳۵°C اتفاق افتاده و با توجه به منحنی TGA با افت وزنی همراه است، به نظر می رسد که مربوط به تخریب اجزای واکنش نکرده سامانه رزینی است.

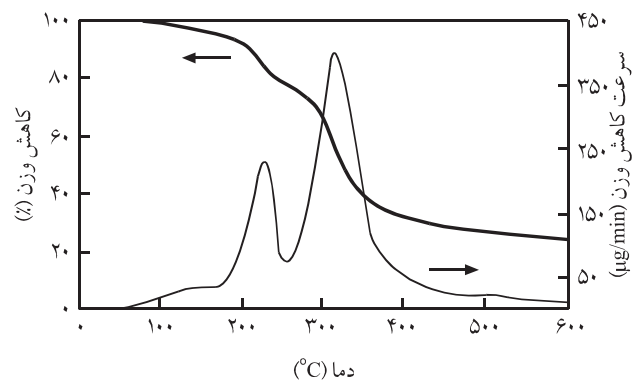
دو پیک گرمای نیز در دماهای بالا دیده می شوند که حاکی از ساز و کار تخریب دمرحله ای این کامپوزیت هستند. پیک اول که بیانگر مرحله اصلی تخریب است، در دمای ۳۰۹°C ظاهر شده است. این دما در محدوده افت وزنی عمده در منحنی TGA یعنی دمای ۳۱۹°C است. پیک پهن دوم (۴۵۸°C) نیز ادامه تخریب را نشان می دهد که این مرحله در منحنی TGA به علت کاهش شدت افت وزنی و سرعت کمتر تخریب، به شکل پیک مجزا ظاهر نشده است.

#### تعیین سرعت سوزش

همان طور که اشاره شد، برای اندازه گیری سرعت گسترش شعله،



شکل ۷ - منحنی DSC عایق کامپوزیتی اپوکسی - پنبه دارای کندسوز کننده.



شکل ۶ - منحنی TGA و DTG عایق کامپوزیتی اپوکسی - پنبه دارای کندسوز کننده.

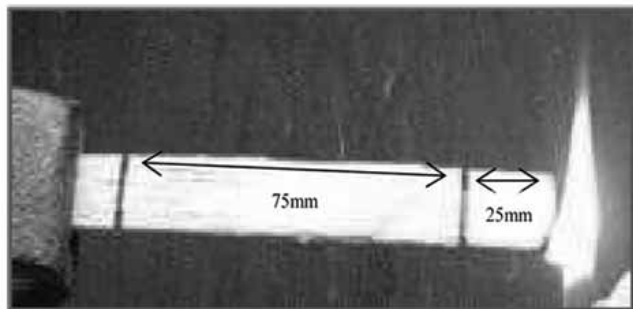
رسیده و در نهایت مقدار زغال باقی مانده ۱۹ درصد به دست آمده است. در شکل ۵ نیز پیک مربوط به دمای ۱۱۹°C در منحنی DTG، تبخیر رطوبت موجود را با کاهش وزن حدود ۶ درصد بیان می کند. هم چنین، پیک واقع در ۳۵۹°C تخریب کامپوزیت را با بیشینه سرعت افت وزنی ۴۳۵ µg/min نشان می دهد. لازم به ذکر است، تخریب الیاف و رزین اپوکسی در محدوده دمایی نزدیک به هم انجام گرفته و پیک های مربوط هم پوشانی دارند [۳].

در شکل ۶ نیز که منحنی های TGA و DTG نمونه قبلی را با افزودن کندسوز کننده نشان می دهد، یک پیک همراه با افت وزنی در دمای ۲۳۲°C مشاهده می شود. به نظر می رسد، این پیک مربوط به تخریب قسمتی از رزین و سخت کننده واکنش نکرده باشد. ظاهراً در این حالت وجود افزودنی ها فرایند پخت را به تأخیر انداخته و مانع از پخت کامل در شرایط اعمالی می شوند.

افت دمای تخریب کامپوزیت نیز این موضوع را تأیید می کند. البته این رویداد با شدت کمتر در پیک مربوط به دمای ۲۱۲°C در شکل ۵ نیز رخ داده است. پیک تجزیه کندسوز کننده تتراکلروفتالیک انیدرید با تخریب کامپوزیت هم پوشانی داشته و در دمای ۳۱۹°C به سرعت بیشینه ۳۹۸ µg/min رسیده است. با توجه به منحنی های TGA شکل های ۵ و ۶ وجود کندسوز کننده، مقدار زغال باقی مانده را در عایق کامپوزیتی ۱۱۴ درصد افزایش داده است.

خلاصه نتایج حاصل از آزمون گرما وزن سنجی نمونه ها در جدول ۴ آمده است. در این جدول، دمای شروع و پایان تخریب گرمایی کامپوزیت، افت وزنی ناشی از تخریب و مقدار زغال باقی مانده در ۶۰۰°C گزارش شده اند. البته لازم به ذکر است، مقدار مواد کندسوز کننده معدنی آهن اکسید و آنتیموان تری اکسید از مقدار زغال باقی مانده کسر شده است.





شکل ۸ - نمونه در معرض شعله چراغ بنزن به مدت ۳۰ s.

عمده‌ای به وجود می‌آید. برای مثال، بزرگ تر بودن مقدار ضریب انبساط گرمایی پیش رانه نسبت به عایق در دمای بالا باعث می‌شود که به جداره عایق فشار وارد شده و ترک ایجاد شود. در دمای پایین نیز نیروی کششی بر فصل مشترک عایق و پیش رانه وارد می‌شود و جدایش در سطح تماس اتفاق می‌افتد [۱].

همان طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، مقدار ضریب انبساط گرمایی عایق اپوکسی - پنبه انطباق خوبی با پیش رانه جامد دارد.

#### آزمون تجزیه گرمایی مکانیکی - دینامیکی

آزمون تجزیه گرمایی مکانیکی - دینامیکی (DMTA) روی نمونه اپوکسی - پنبه دارای کندسوزکننده انجام گرفت و نتایج حاصل از آن به شکل منحنی‌های مدول ذخیره یا کشسان ( $E'$ ) و ضریب اتلاف ( $\tan \delta$ ) بر حسب دما به دست آمد (شکل ۹).

در منحنی ضریب اتلاف بر حسب دما، دمای مربوط به پیک ظاهر شده همان دمای شیشه‌ای شدن ( $T_g$ ) پلیمر است. دمای شیشه‌ای شدن انتقال از حالت شیشه‌ای به حالت لاستیکی است که به دلیل تحرک مولکول‌های پلیمر با افت مدول همراه است. بر این اساس دمای  $T_g$  نمونه اپوکسی - پنبه در محدوده دمایی ۵۸ تا ۶۳°C و ضریب اتلاف آن ۰/۴۸ به دست آمد.  $\tan \delta$  یا ضریب اتلاف، نسبت مدول گرانیو به مدول کشسان پلیمر است. بنابراین، مقدار زیاد ضریب اتلاف، جذب انرژی و میرایی بیشتر را در پی دارد.

جدول ۶ - نتایج حاصل از آزمون DMTA.

ویژگی	اپوکسی - پنبه (با کندسوزکننده)	پیش رانه جامد دو پایه
ضریب انبساط گرمایی ( $^{\circ}C^{-1}$ )	$94 \times 10^{-6}$	$92/5 \times 10^{-6}$

نمونه‌ها به مدت ۳۰ s در معرض شعله چراغ بنزن قرار گرفتند. برای بررسی اثر مواد کندسوزکننده، این آزمون روی هر دو نمونه با کندسوزکننده (۴٪ آنتیموان اکسید و ۱۲٪ تتراکلوروفتالیک انیدرید) و بدون آن انجام گرفت. روش اندازه‌گیری بدین شکل است که:

- اگر شعله تا قبل از نشانه واقع در فاصله ۲۵ mm یا هم زمان با رسیدن به آن خاموش شود، شعله خودخاموش شونده (self-extinguished flame) نامیده می‌شود که مؤید کمترین سرعت سوزش است.

- چنان چه در فاصله ۲۵ تا ۱۰۰ mm خاموش شود، ضمن این که به عنوان شعله خودخاموش شونده گزارش می‌شود، زمان و مقدار گسترش شعله از مرجع اول (یعنی نشان ۲۵ mm) تا جایی که شعله متوقف شده، محاسبه و ذکر می‌شود.

- اگر شعله به نشانه واقع در ۱۰۰ mm برسد، فاصله‌ای که شعله بین دو نشانه طی کرده (یعنی ۷۵ mm) را به مدت زمان پیش روی آن در این طول، تقسیم کرده و سرعت سوزش نمونه مطابق با معادله (۱) محاسبه می‌شود:

$$V = 60L/t \quad (1)$$

که  $V$  سرعت گسترش شعله بر حسب  $mm/min$ ،  $L$  معادل ۷۵ mm و  $t$  مدت زمان پیش روی شعله بین دو نشانه با یکای ثانیه است.

همان طور که انتظار می‌رفت، شعله در نمونه بدون کندسوزکننده تا نشانه واقع در ۱۰۰ mm پیش رفته و سرعت سوزش آن با معادله (۱) محاسبه شد. در حالی که در نمونه با کندسوزکننده شعله پیش از رسیدن به نشانه ۲۵ mm خاموش شد. جدول ۵ نتایج این آزمون و شکل ۸ نمونه‌ای را در حال انجام این آزمون نشان می‌دهد.

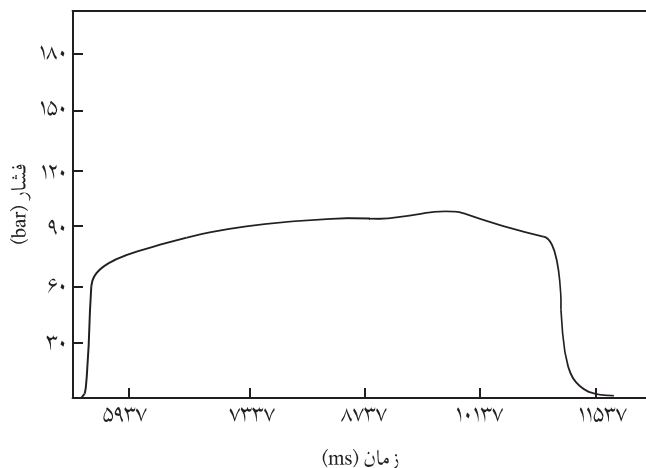
#### آزمون تجزیه گرمای مکانیکی

در جدول ۶ مقادیر ضریب انبساط گرمایی نمونه اپوکسی - پنبه دارای کندسوزکننده و پیش رانه جامد، حاصل از آزمون تجزیه گرمای مکانیکی (TMA) آورده شده است. معمولاً در قطعات عایق کاری شده به علت اختلاف در ضرایب انبساط و انقباض گرمایی عایق با پیش رانه مشکلات

جدول ۵ - نتایج سرعت سوزش عایق اپوکسی - پنبه.

نوع عایق	سرعت سوزش ( $mm/min$ )
اپوکسی - پنبه (بدون کندسوزکننده)	۲۷۱
اپوکسی - پنبه (با کندسوزکننده)	شعله خود خاموش شونده*

\* شعله قبل از رسیدن به نشان واقع در ۲۵ mm خاموش شد.



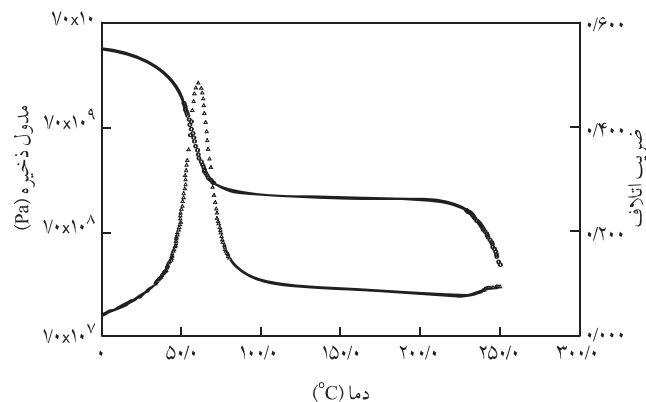
شکل ۱۰ - منحنی فشار - زمان آزمون موتور ایستا در موتور عایق کاری شده با کامپوزیت اپوکسی - پنبه دارای کندسوزکننده.

### نتیجه گیری

نتایج نشان داد، کامپوزیت اپوکسی - پنبه به عنوان عایق پیش رانه جامد دوپایه، دارای ویژگی‌هایی مانند چگالی کم، سازگاری شیمیایی با پیش رانه و اتصال قوی با آن، پایداری گرمایی مناسب حین احتراق، افزایش زمان سوزش، قابلیت تشکیل زغال کربنی پایدار، انعطاف پذیری مطلوب، ارزانی مواد اولیه و امکان تهیه در داخل کشور و سهولت فرایند عایق کاری است. هم چنین مشخص شد، ضرایب انبساط گرمایی عایق یاد شده و پیش رانه جامد دوپایه مطابقت مطلوبی با یکدیگر دارند. منحنی یکنواخت و بدون شیب فشار - زمان حاصل از آزمون موتور ایستا نیز تأییدی بر عملکرد موفقیت آمیز عایق اپوکسی - پنبه است.

### مراجع

- Sottun G.P. and Biblarz O., *Rocket Propulsion Elements*, 7th ed., John Wiley and Sons, 450-480, 2000.
- Majidian D. and Bakhshandeh G.R., *Elastomeric Insulator for Rockets, Iran. J. Polym. Sci. Technol. (In Persian)*, **2**, 91-98, 1992.
- Mouritz A.P. and Gibson A.G., *Fire Properties of Polymer Composite Materials*, Springer, Chap. 8, 237-286, 2006.
- Klyosov A.A., *Wood-Plastic Composites*, John Wiley and Sons, Chap. 14, 461-492, 2007.
- Atkinson P.A., Haines P.J., Skinner G.A., and Lever T.J., *Studies of Fire-Retardant Polyester Thermosets Using Thermal Meth-*



شکل ۹ - منحنی مدول ذخیره و ضریب اتلاف بر حسب دمای نمونه اپوکسی - پنبه دارای کندسوزکننده.

### آزمون موتور ایستا

در موتورهای موشک برای اندازه گیری پارامترهایی مانند نیروی جلوبرندگی (trust)، سرعت گازهای خروجی، دما و فشار گازهای محفظه احتراق موتور را روی پایه‌های محکمی ثابت می‌کنند. پس از راه‌اندازی آن، پارامترهای یاد شده را با روش‌های خاصی اندازه گیری می‌کنند. در اندازه گیری این پارامترها چگونگی قرارگیری حسگرها و مکان آنها بسیار مهم است.

در این پژوهش، آزمون موتور ایستا نیز با دمای شعله  $3000^{\circ}\text{C}$  روی موتور دارای پیش رانه دوپایه عایق کاری شده با اپوکسی - پنبه انجام گرفت. در شکل ۱۰، منحنی فشار - زمان حاصل از آن آورده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، در این منحنی تغییر ناگهانی در شیب روی نداده و افزایش یا کاهش فشار به وجود نیامده است. عایق یاد شده توانست  $80\text{ bar}$  فشار متوسط داخل محفظه موتور را تحمل کند.

- ods, *J. Therm. Anal. Cal.*, **59**, 395-408, 2000.
- Agrawal J.P. and Pokharkar R.D., *Inhibition of Rocket Propellants*, *J. Sci. Ind. Res.*, **39**, 633-640, 1980.
- Agrawal J.P. and Vergnaud J.M., *Genesis of Development of Inhibition Technology for Rocket Propellants and Recent Work*, *J. Sci. Ind. Res.*, **51**, 375-382, 1992.
- Hsu Y.S., *Development of Polyesters as Propellant Inhibitors*, MSc Thesis, Materials Science and Engineering Department, National Sun Yat-Sen University, China-Tiwan, June 2003.
- Dong-lin L., Ji-ping C., and Ji-gui W., *Ablation Performance of Unsaturated Polyester Inhibitor*, *Chin. J. Explos. Propel.*, **29**, 61-



- 70, 2006.
10. Agrawal J.P. and Agawane N.T., Nitroglycerine (NG) Migration to Varios Unsaturated Polyesters and Chloropolyesters Used for Inhibition of Rocket Propellants, *Propel. Explos. Pyrotech.*, **24**, 371-378, 1999.
11. Ji-ping C., Dong-lin L., and Ji-gui W., Study of UP Coating Double Based Propellants with DNT, *Chine. J. Explos Propel.*, **29**, 101-109, 2006.
12. Yu F.E., *Study on the Ablation Materials of Modified Polyurethane/Polysiloxane*, PhD Thesis, Materials Science and Engineering Department, National Sun Yat-Sen University, China-Tiwan, July 2004.
13. Katz G.S. and Milewski D.V., *Handbook of Fillers and Reinforcements for Plastics*, Moscow, 272-277, 1981.
14. Mazumdar S.K., *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering*, CRC, 2002 (Translated by Rasouli A., Persian, 254, Tabriz University, 2004).