



Performance of Aerogel Blanket Composite Against Direct Explosion of the Energetic Materials

H. Bargozin¹, T. Yousefi Amiri^{1*}, A. Mehrafarin²

1- Assistant Professors of Chemical Engineering, University of Zanjan

2- Ph. D. Chemical Technology Development Center, Tehran

Email: yousefiamiri@znu.ac.ir

Abstract

Energetic materials production has the risk of uncontrolled explosion at high temperature which is hazardous for personnel and equipment. Flexible aerogel blanket is fireproofing and has the lowest heat transfer among the thermal insulations. In this study, aerogel blanket with 3mm thickness have been used as insulating layer within multilayer composite textiles contain clothes which are fireproof and compatible with the body. Then, its performance as heat transfer barrier have been evaluated against explosion of the energetic materials. Direct fire testing at controlled conditions and field testing under uncontrolled explosion of the energetic materials have been performed. Results showed that aerogel composites have high capability in preventing from the temperature rising and burning of persons exposed in explosion of energetic materials. When aerogel composite exposed to explosion of energetic materials, the temperature of the other side of the composite did not exceed from the pain threshold temperature (44oC). Also, the experimental testing showed the aerogel composites provide sufficient time for escape and avoid from burn injury. Flexibility and thickness of the aerogel composites are such that it is possible to prepare insulating and fireproofing clothes using them.

Received: 28 April 2023

Accepted: 18 July 2023

Page Number: 81-95

Keywords:

Silica Aerogel,
Flexible Blanket,
Nanoporous, Energetic
Materials Explosion,
Heat Insulation,
Fireproofing

Please Cite this Article Using:

Bargozin, H., Yousefi Amiri, T., & Mehrafarin, A. (2024). Performance of Aerogel Blanket Composite Against Direct Explosion of the Energetic Materials. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 23(134), 81-95, [In Persian].



ارزیابی کارایی کامپوزیت پتوی آبروژل در برابر حریق مستقیم مواد پرانرژی

حسن برگزین^۱، طاهر یوسفی امیری^{۱*}، علی مهرآفرین^۲

۱- استادیار مهندسی شیمی، دانشگاه زنجان

۲- دکتری مهندسی شیمی، مرکز توسعه فناوری شیمیایی

پیام نگار: yousefiamiri@znu.ac.ir

چکیده

تولید مواد پرانرژی می‌تواند دارای ریسک احتراق ناگهانی با دماهای بسیار بالا باشد که سبب به‌مخاطره‌افتادن نفرات و تجهیزات می‌شود. پتوی منعطف آبروژل دارای کمترین ضریب انتقال حرارت در میان عایق‌های حرارتی و ضد حریق است. در این تحقیق تجربی پتوی منعطف آبروژل با ضخامت ۳ میلی‌متر در فرم کامپوزیت دوخته‌شده با منسوجات نسوز و سازگار با بدن تهیه شده‌است و کارایی آن به‌منظور جلوگیری از انتقال گرما وقتی یک طرف آن در تماس با مواد پرانرژی در حال احتراق قرار داده می‌شود، ارزیابی شده‌است. بدین منظور از تست شعله در شرایط کنترل‌شده و آزمون میدانی با مواد پرانرژی استفاده شد. نتایج نشان می‌دهند که کامپوزیت آبروژل با ضخامت کم، پتانسیل بسیار بالایی در جلوگیری از افزایش دما و سوختگی ناشی از احتراق مواد پرانرژی دارد، وقتی عایق در آزمون میدانی در معرض احتراق مواد پرانرژی قرار می‌گیرد، دمای سمت دیگر آن‌ها از دمای آستانه درد (۴۴ درجه سلسیوس) پایین‌تر می‌ماند. همچنین آزمایش‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند که کامپوزیت‌های آبروژلی زمان کافی را برای فرار از احتراق بدون آسیب دیدگی فراهم می‌کنند. انعطاف و ضخامت کامپوزیت‌های آبروژلی به‌گونه‌ای است که امکان ساخت لباس‌های عایق و ضدحریق با آن‌ها وجود دارد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۷

شماره صفحات: ۸۱ تا ۹۵

کلیدواژه‌ها:

آبروژل سیلیکایی،
پتوی منعطف،
نانومتخلخل،
انفجار مواد پرانرژی،
عایق حرارت،
ضدحریق

* زنجان، دانشگاه زنجان، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی شیمی

استناد به مقاله:

برگزین، حسن، یوسفی امیری، طاهر، مهرآفرین، علی. (۱۴۰۳). ارزیابی کارایی کامپوزیت پتوی آبروژل در برابر حریق مستقیم مواد پرانرژی، نشریه مهندسی شیمی ایران، ۲۳(۱۳۴)، ۸۱-۹۵.

۱. مقدمه

۱-۱ آبروژل سیلیکایی

نخستین بار آقای پروفسور کیستلر از اساتید مهندسی شیمی در سال ۱۹۳۰ آبروژها را ساخت، ولی توجه و گسترش دوباره آن‌ها از ۱۹۷۰ شروع شد [۱]. این مواد فرصت‌های بسیاری را در زمینه‌های مختلف مهندسی ایجاد کرده‌اند. آبروژل‌ها دسته‌ای از مواد جامد با چگالی بسیار پایین و تخلخل بسیار بالا و سطح ویژه بزرگ هستند. آبروژل از نانوذرات به هم پیوسته تشکیل شده که یک شبکه سه‌بعدی بسیار متخلخل - که غالب حفره‌های آن در ابعاد مزوحفره ۲ الی ۵۰ نانومتر است - را تشکیل می‌دهند [۲ و ۳]. آبروژل‌های سیلیکایی دارای سطح ویژه بزرگ (تا $1200 \text{ m}^2/\text{g}$)، تخلخل بالا (۹۸-۹۰٪)، هدایت گرمایی پایین (0.05 W/mK)، ثابت شکست دی‌الکتریک پایین (۲-۱) و سرعت پایین صوت (100 m/s) هستند [۱ و ۲]. تشکیل آبروژل‌ها عموماً شامل دو مرحله اصلی است: تشکیل ژل مرطوب و خشک کردن ژل مرطوب برای رسیدن به آبروژل. اگر مایع داخل حفره‌های ژل، بدون تغییر یا انقباض در ساختار شبکه‌ای ژل با هوا جای‌گزین شود، آبروژل به دست می‌آید. برای تهیه آبروژل در ابتدا طی فرایند سل - ژل یک شبکه جامد نانو ساختار که از هیدرولیز و پلیمریزاسیون پیش‌ماده‌های مربوطه ایجاد شده و حفره‌های داخل آن با مایع پر شده است، تشکیل می‌شود. مایع داخل حفره‌ها شامل حلال اولیه و محصول جانبی واکنش‌های هیدرولیز (آبکافت) و پلیمریزاسیون (بَسپارش) است [۱]. در مرحله اول فرایند سل - ژل ذرات سیلیکایی کلوئیدی جامد یعنی ذراتی با اندازه کوچک‌تر از یک میکرومتر یا کمابیش الیگومرهای خطی تشکیل می‌شوند. این سوسپانسیون (آویزش) کلوئیدی ذرات جامد در مایع، سل نامیده می‌شود. در مرحله دوم این ذرات اولیه می‌توانند در داخل حلال به یکدیگر متصل شده، یک ساختار جامد شبکه‌ای پیوسته سه‌بعدی با حفره‌های باز را که ژل نامیده می‌شود به وجود آورند [۴]. در ادامه برای به دست آوردن آبروژل، ضروری است که حلال بدون ایجاد انقباض و همرفتگی در ژل و تخریب حفره‌های آن خارج شود و سیلیکای نانو ساختار را به صورت سالم و خشک ترک کند. بدین منظور از روش‌های مختلفی مانند خشک‌سازی اتمسفریک، خشک‌سازی فوق بحرانی دما بالا، خشک‌سازی فوق بحرانی دما پایین، خشک‌سازی انجمادی و غیره استفاده می‌شود [۱ و ۲].

۱-۲ آبروژل به‌عنوان عایق در لباس‌های ضد حریق

تولیدکنندگان مواد پرانرژی و حساس حرارتی، به افزایش سیستم ایمنی کارکنان خود در برابر شعله‌های ناگهانی و با دمای بالا نیاز دارند. حریق ناگهانی مواد پرانرژی و با دمای بالا در مجاورت کارکنان سبب ایجاد سوختگی‌های شدید و در برخی موارد سبب تلفات می‌شود [۵]. در انفجار مواد پرانرژی، حریق غیر قابل کنترل است و سرعت ایجاد آن به قدری بالاست که نفر، فرصت کافی برای فرار یا خاموش کردن حریق ندارد. نفرات در فاصله کم از منبع شعله هستند و دمای بالای شعله سبب می‌شود تا انرژی عمدتاً با سازوکار تشعشع باعث تخریب پوشش‌های محافظتی و سوختگی نفرات شود. مواد پرانرژی که در صنایع نظامی و دفاعی استفاده می‌شوند انواع مختلفی دارند. برخی از این مواد، مانند مواد برپایه فسفر در هنگام احتراق آدیاباتیک، حرارت و دماهای بسیار بالا و نزدیک 2800 درجه سلسیوس را می‌توانند ایجاد کنند.

لباس‌های محافظتی رایج که از منسوجات و عایق‌های نسوز معمولی پلیمری استفاده می‌کنند، کارایی لازم را ندارند و دماهای حدود 350 درجه سلسیوس را می‌توانند برای کوتاه‌مدت تحمل کنند [۶-۸]. بر اساس بررسی‌های میدانی، زمانی که نفر نیاز دارد تا شود حدود ۳۰ ثانیه است. به عبارت دیگر اگر لباس محافظتی بتواند در این مدت زمان مانع از سوختگی یا آسیب شدید نفر شود، امکان فرار و حفظ جان وجود خواهد داشت.

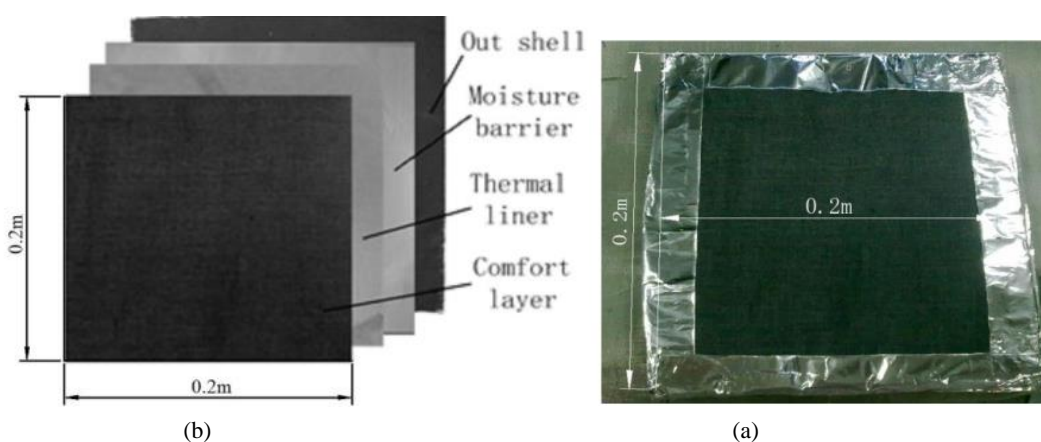
آبروژل‌های سیلیکایی نانومتخلخل به‌عنوان نسل جدید عایق‌های حرارتی و کرایوتیک هستند که بر مبنای فناوری نانو به‌صورت معرفی شده‌اند و بر اساس خصوصیات ویژه خود، تحولی را در این حوزه ایجاد کرده‌اند. آبروژل‌های سیلیکایی در انواع فرم‌ها مانند پتوهای منعطف، صفحات غیرمنعطف، پودر، گرانول، افزودنی در رنگ، گچ، سیمان و انواع نانو کامپوزیت‌های آبروژل، تولید و استفاده می‌شوند. فرم پتوی منعطف در ضخامت‌های مختلف برای تولید لباس ضد حریق قابل استفاده است و با داشتن خصوصیات مورد نیاز لباس مورد استفاده در این صنعت است. لباس‌های رایج عمدتاً از پارچه‌های نسوز با بستر پلیمری شامل نومکس، کولار، کرمل، PBI و غیره هستند که دمای ذوب پایین و در حدود 350 درجه سلسیوس دارند. این نوع پارچه‌ها، اگرچه ممکن است در استفاده راحت‌تر

باشند؛ ولی دارای قیمت بالایی اند و تحمل حرارتی مناسبی ندارند [۶ و ۹]. مطالعات متعددی در استفاده از پتوهای آبروژل سیلیکایی نانومتخلخل در لباس‌های حفاظتی حرارتی مانند لباس‌های آتش‌نشان‌ها گزارش شده است که همگی آن‌ها کارایی فوق‌العاده حرارتی آبروژل‌ها را تأیید کرده‌اند [۱۰-۱۲ و ۶]. در مطالعه هوانگ و همکاران، لایه آبروژلی به منظور بالابردن خاصیت عایق حرارتی لباس آتش‌نشانی به آن افزوده و مطالعه عملکرد آن در معرض آتش مستقیم انجام شد. برای مطالعه عملکرد حرارتی از آزمون استاندارد اتاقک آتش ISO9705 استفاده شده است [۱۳]. نمونه‌ها بر روی دیواره اتاقک آتش قرار داده می‌شوند، بعد از روشن شدن آتش در داخل اتاقک، دمای سمت بیرونی نمونه‌ها اندازه‌گیری می‌شود. لایه بیرونی لباس به سمت اتاقک آتش و لایه راحتی یا داخلی لباس به سمت محیط بیرون قرار داده می‌شود [۱۳ و ۱۲]. نمونه مورد مطالعه متشکل از چهار لایه شامل لایه راحتی، آستر حرارتی، لایه محافظ (مانع) رطوبت و لایه بیرونی است. لایه بیرونی الیاف آرامیدی XDB602 است که به منظور محافظت در مقابل گرما و شوک‌های فیزیکی به کار رفته است. لایه محافظ رطوبت متشکل از الیاف آرامیدی پوشش داده شده با لایه پلی‌تترا فلورو اتیلن است. آستر حرارتی از نمد آرامیدی ساخته شده است که به عنوان عایق برای محافظت از بدن در برابر گرما عمل می‌کند. نهایتاً، لایه راحتی پارچه پنبه‌ای ضد شعله است. ضخامت کلی آستر حرارتی تجاری ۲/۵۸ میلی‌متر است که در این مطالعه با

بلکنت‌های آبروژلی با ضخامت‌های ۳، ۶ و ۱۰ میلی‌متر جای‌گزین شده و عملکرد نمونه‌ها مطالعه و مقایسه شد. ساختار کلی نمونه‌های استفاده شده در شکل (۱) ارائه شده است.

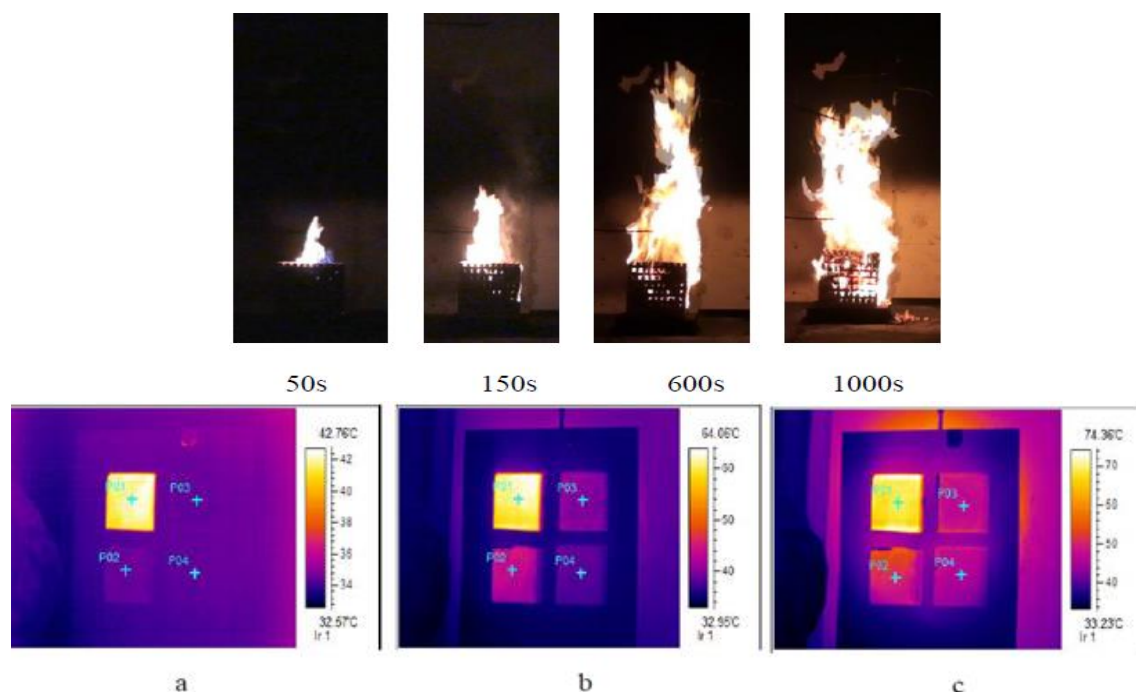
در لباس اولیه بدون آبروژل، مشاهده شد که لایه محافظ رطوبت که از PTFE ساخته شده، کربنیزه شد و تعداد زیادی ترک بر روی آن ایجاد شد؛ اما وقتی لایه آبروژلی اضافه می‌شود، لایه محافظ رطوبت تنها تغییر رنگ می‌دهد و خروج گاز از آن مشاهده می‌شود و تغییر رنگ این لایه با افزایش ضخامت لایه آبروژلی کمتر می‌شود. این پدیده، نشانگر تخریب ماده است. لایه حرارتی نیز برای هر دو نمونه اولیه و نمونه دارای لایه آبروژلی تغییر رنگ می‌دهد؛ اما تغییر رنگ آن با افزایش ضخامت لایه آبروژلی کمتر می‌شود.

رنگ لایه راحتی برای نمونه اولیه قهوه‌ای تیره می‌شود، در حالی که برای نمونه دارای لایه آبروژلی، لایه راحتی تقریباً به‌گونه‌ای است که حرارت محسوس به آن نرسیده است. در شکل (۲) دمای حریق در اتاقک به حدود ۱۰۰۰ درجه سلسیوس رسیده و دمای سطح بیرونی کامپوزیت‌ها بعد از ۲۰۰۰ ثانیه در مکان‌های مختلف در بیشترین حالت حدود ۷۵ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد که نشان می‌دهد اختلاف دمای زیادی در دو طرف نمونه‌های دارای لایه پتوی آبروژل ثبت شده است. دمای سطح لایه راحتی لباس آتش‌نشانی تجاری همیشه بالاتر از دمای نمونه‌های دارای آبروژل شد که نشان می‌دهد عملکرد حرارتی لایه آبروژلی نسبت به آستر حرارتی مرسوم مورد استفاده در لباس آتش‌نشانی به‌طور محسوس بالاتر است [۱۳].



شکل ۱. (a) لایه‌های موجود در هر نمونه و (b) ساختار کلی نمونه‌های تهیه شده برای استفاده در دیواره اتاقک آتش [۱۳].

Figure 1. (a) Layers in each sample and (b) overall structure of the samples used in burning room.



شکل ۲. ایجاد حریق در داخل اتاق اشتعال و تغییر دمای سطح عایق‌های مختلف کار گذاشته شده در دیوار اتاق با مرور زمان بعد از حریق. (a) ۱۰۰ ثانیه، (b) ۵۰۰ ثانیه و (c) ۲۰۰۰ ثانیه [۱۳].

Figure 2. Fire process in burning room and IR image of outer layer of burning room insulated with prepared samples after fire (a) 100s, (b) 500s and (c) 2000s.

شده است. برای نمونه‌های تهیه شده، مقادیر مقاومت حرارتی نرمال، مقاومت حرارتی تحت فشار، عبوردهی هوا، مقاومت در برابر عبور مایع، مقاومت در برابر بخار آب و شاخص عبوردهی رطوبت اندازه‌گیری شدند. در این مطالعه نتیجه شده است که ماده تقویت‌کننده مورد استفاده در لباس آتش‌نشانی تجاری وقتی که بر روی سطح داغ فشرده می‌شود، کمترین مقاومت حرارتی را نسبت به سایر نمونه‌ها دارد. از طرف دیگر، لایه آبروژلی مقاومت حرارتی تراکمی بیشتری نسبت به ۱۰ لایه از ماده تجاری نشان داد. دمای بدن انسان حدود 37°C است. پوست انسان در حدود 44°C احساس درد می‌کند و اولین درجه از سوختگی را در دمای 48°C دریافت می‌کند و درجه دوم سوختگی را که برگشت‌ناپذیر است، در دمای 55°C دریافت می‌کند. پوست انسان به سرعت در تماس با دمای 72°C از بین می‌رود. فاصله زمانی بین احساس درد تا دریافت سوختگی زمان فرار آتش‌نشان‌ها از موقعیت خطرناک است. دمای ماده تقویت‌کننده تجاری در شرایط قرارگیری بر روی سطح با دمای 200°C ، به سرعت طی مدت ۳۰ ثانیه به بالای 70°C (دمای سوختگی سریع) می‌رسد، در حالی که برای نمونه حاوی پتوی

در تحقیقات آقای چاکرابورتی و همکاران بلکنت آبروژل از سنتز آبروژل روی بستر نمد دوخت‌نشده Nomex m-aramid تهیه شد [۱۴]. لایه حرارتی مورد مطالعه، متشکل از سه لایه شامل الیاف دوخت‌شده Nomex IIIA به‌عنوان لایه بیرونی، بلکنت آبروژلی به‌عنوان لایه میانی و الیاف ترکیبی اکریلیک/پنبه (۶۰ به ۴۰) به‌عنوان لایه داخلی استفاده شد. برای مقایسه و مطالعه عملکرد لایه آبروژلی، از لایه میانی در نمونه شاهد با بستر خالی Nomex m-aramid استفاده شد. نمونه‌ها در معرض شار گرمایی تشعشی 35kW/m^2 قرار داده شدند و زمان لازم برای رسیدن به دمای لازم در ایجاد آسیب سوختگی بر اساس منحنی Stoll یادداشت شد. زمان محافظت $63/4$ ثانیه ($58/5$ افزایش) برای نمونه آبروژلی تهیه شده، دیده شد. بنابراین، بلکنت آبروژلی نسبت به بستر خالی می‌تواند منجر به افزایش حدود 58% زمان محافظت حرارتی قبل از رسیدن به دمای سوختگی شود [۱۴].

در مطالعه آقای شید و همکاران در سال ۲۰۱۸ ترکیبی از لایه‌های مختلف برای ارزیابی و مقایسه عملکرد آن‌ها طراحی و ساخته

آبروژل، رسیدن به این دما بعد از ۴ دقیقه اتفاق می‌افتد. بنابراین، لایه آبروژلی ۸ برابر بهتر از ماده تقویت‌کننده موجود و ۲ برابر بهتر از ترکیب آستر حرارتی و لایه مانع رطوبت در لباس‌های آتش‌نشانی عمل می‌کند. بدون هیچ ماده تقویت‌کننده‌ای، وقتی فقط یک لایه آبروژلی به کار می‌رود، ۸۶ ثانیه زمان احساس درد، ۱۰۷ ثانیه زمان احساس درجه اول سوختگی و ۲/۵ دقیقه زمان احساس سوختگی درجه دوم است. بنابراین زمان فرار بیش از ۱ دقیقه خواهد بود. این زمان برای ماده تقویت‌کننده و آستر حرارتی تنها ۵ ثانیه است [۱۵]. آقای ژانگ و همکاران از لایه‌های پتوی آبروژل و مواد تغییر فازدهنده برای بهبود عملکرد منسوجات لباس آتش‌نشانی استفاده کردند. آنان از لایه‌های منسوجات رایج حرارتی، لایه حاوی مواد تغییر فازدهنده و لایه پتوی آبروژل برای این منظور استفاده کردند. نمونه‌ها در مقابل شرایط متوسط تشعشع ۱۵ کیلووات بر متر مربع به مدت ۲۴۰ ثانیه قرار گرفتند و مدل سوختگی پوست برای درجه دوم سوختگی مطالعه شد. نتایج نشان داد که زمان رسیدن به دمای سوختگی ۲۱۸ ثانیه است و بیش از ۹۰ درصد نسبت به منسوج رایج حرارتی افزایش ایجاد شد [۱۶]. آقای جین و همکاران از آبروژل دار کردن منسوجات رایج پلیمری برای بهبود عملکرد محافظت حرارتی منسوجات لباس آتش‌نشانی به روش شعله مستقیم (شکل ۳)) مطابق با استاندارد ISO 9151 استفاده کردند. آنان از مخلوط ۵ درصد وزنی آبروژل پخش شده در استن برای نشان دادن آبروژل در منسوجات استفاده کردند. رفتار تخریب حرارتی، مقاومت در برابر شعله، عبورپذیری بخار آب

منسوجات بهبود داده شده با آبروژل و همچنین مقایسه آسیب‌های سوختگی با استفاده از تست مانکن برای لباس آتش‌نشانی معمولی و لباس آبروژل دار بررسی شد [۱۷].

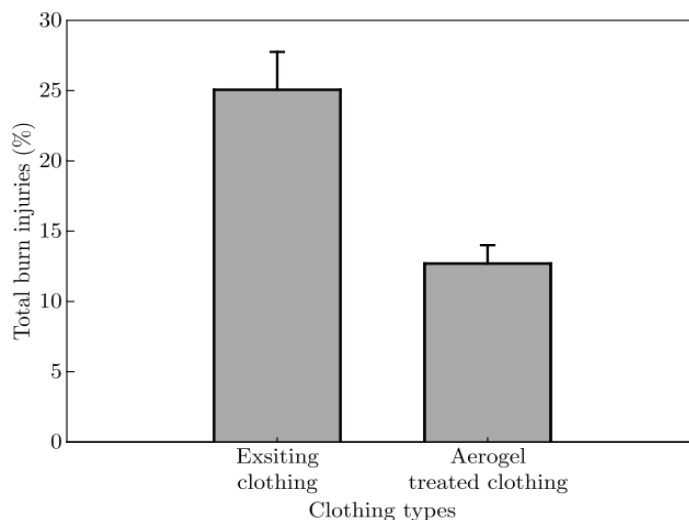
در این آزمون شار حرارتی حدود ۸۰ کیلووات بر متر مربع ایجاد و زمان رسیدن به دمای ۴۹ درجه سلسیوس اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان دادند که منسوجات بهبود داده شده با آبروژل نتایج بهتری از لحاظ محافظت حرارتی حاصل کردند. در شکل (۴) مشاهده می‌شود که با آبروژل دار کردن بستر الیاف پلیمری رایج لباس آتش‌نشانی، میزان آسیب‌های وارده تا بیش از ۵۰ درصد کاهش می‌یابند که می‌تواند منجر به حفظ جان نفر در هنگام حریق‌های مختلف شود.

علاوه بر بحث حریق و مقاومت لباس‌های مختلف در برابر آن، موارد دیگری نیز در لباس‌های صنایع نظامی نسبت به لباس‌های آتش‌نشانی وجود دارد که در ساخت آن‌ها باید محل توجه قرار گیرند. آقای فتح‌اللهی و همکاران و آقای طالبی و همکاران اثر خطر تخلیه بار الکترواستاتیک در انفجار مواد پراثری را بررسی کردند. در صنعت مواد پراثری، بار الکتریکی ساکن می‌تواند بسیار خطرناک باشد و تخلیه الکتریکی به صورت جرقه می‌تواند سبب انفجار مواد پراثری شود. میزان حساسیت مواد پراثری مختلف نسبت به بار الکتریکی متفاوت بوده و راه‌کارهایی برای کنترل و کاهش خطرات ارائه شده است [۲۰-۱۸]. پتوهای آبروژل و انواع پارچه‌های نسوز خاصیت نگهداری بار استاتیک دارند که برای رفع این مشکل باید از لایه رویی ضد الکتریسیته ساکن استفاده شود.



شکل ۳. آزمون شعله مستقیم مانکن با دمای حدود ۱۱۰۰ درجه سلسیوس [۱۷].

Figure 3- Direct fire testing of a manikin with temperature of 1100°C.



شکل ۴. آسیب‌های وارد شده به مانکن در آزمون شعله مستقیم با شار حرارتی 84 Kw/m^2 [۱۷].

Figure 4. Percentage of total burn injury in manikin testing system under 84 kW/m^2 heat flux density.

۲. روش کار

۲-۱ ساخت پتوی آبروژل

پتوهای آبروژلی مورد استفاده، تولید شرکت پاکان آتیه نانودانش است. برای تهیه پتوی آبروژل سیلیکایی روش سل-ژل به کار رفته است. سل سیلیکا با افزودن آب به سدیم سیلیکات صنعتی و اختلاط قوی آن تهیه می‌شود. سپس برای تسریع فرایند سل-ژل کاتالیزت مد نظر به سل، اضافه و بعد از رسیدن به pH مد نظر، بستریهای فایبرگلاس به طور کامل در سل فرو برده و کاملاً با محلول خیسانده می‌شود. سپس زمان داده می‌شود تا سل حاصل به ژل تبدیل شود و بستر کاملاً با ژل پر شود. سپس، ژل حاصل با آب شست‌وشو داده می‌شود تا هرگونه ناخالصی یا نمک حاصل از حفره‌های ژل خارج شود. سپس بستریهای حاوی ژل باروش فوق بحرانی، خشک و پتوی آبروژلی حاصل می‌شود.

۲-۲ ساخت عایق کامپوزیتی دارای پتوی آبروژل

نانوکامپوزیت‌های منعطف آبروژل همانند شکل (۵) نشان داده شده در ابعاد ۵۰ در ۵۰ سانتیمتر برای تست میدانی و در ابعاد ۳۰ سانت در ۳۰ سانت برای تست آزمایشگاهی تهیه شدند. بخش رو به شعله و حرارت از جنس پارچه‌های نسوز فایبرگلس با روکش سیلیکونی (نارنجی) یا روکش پلی‌یورتان (طوسی) بود و لایه داخلی از پارچه معمولی تهیه شد. پتوی آبروژل در ضخامت‌های مختلف ۳ و ۶

هم‌چنین لایه‌های نهایی در لباس باید علاوه بر راحتی فیزیکی، امکان تهویه مناسب هوا و خروج عرق بدن را داشته باشند تا دمای بدن بالا نرود. افزایش دمای بدن موجب استرس حرارتی و گرم‌زدگی نفر می‌شود. پتوهای آبروژل نانومتخلخل دارای تخلخل مناسب برای تنفس‌اند و امکان عبور هوا و بخار آب را می‌دهند [۱۷ و ۱۲ و ۹ و ۶]. مهم‌ترین خصوصیت شیت مد نظر، تحمل دماهای بالا و عدم عبوردهی حرارت است تا در هنگام احتراق مواد پرنانرژی، دمای سطح بدن به دمای سوختگی در زمان مشخص نرسد. پتوهای آبروژل با داشتن مقاومت حرارتی بسیار بالا و خاصیت ضد احتراقی، بهترین گزینه برای دستیابی به این هدف هستند. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های مورد نیاز نانوکامپوزیت، داشتن انعطاف کافی برای قابلیت دوخت لباس‌های محافظ است. با توجه به خصوصیات آبروژل، نیاز است تا پتوی آن به صورت کامپوزیتی مابین پارچه‌های مختلف قرار گرفته و دوخته شود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با وجود گزارش‌های بسیار مثبت از کارایی فوق‌العاده آبروژل‌ها در سامانه‌های حرارتی مختلف، مطالعه‌ای بر روی تست کارایی آبروژل در برابر مواد پرنانرژی ارائه نشده است. بدین منظور در این تحقیق سعی می‌شود تا کارایی کامپوزیت‌های حرارتی دارای پتوی آبروژل در شرایط مختلف میدانی و آزمایشگاهی آزمون شود و قابلیت استفاده از آن‌ها برای جلوگیری از آسیب به نفرت مشغول در خطوط تولید مواد پرنانرژی ارزیابی شود.

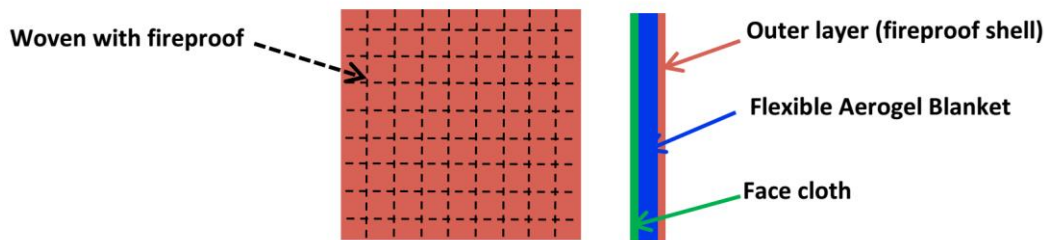
میلیمتر مابین دو پارچه ذکر شده قرار گرفت و با نخ نسوز در فواصل مختلف دوخت شد (جدول (۱)).

۳. نتایج و بحث

۳-۱-۳ خواص آبروژل سیلیکایی مورد استفاده

عایق‌های حرارتی و برودتی آبروژل دارای خصوصیات بسیار کاربردی و یگانه‌ای هستند که سبب شده امروزه به شدت از طرف صنایع بزرگ استفاده شوند. عایق‌های آبروژل دارای چگالی بسیار کم و حفره‌های آن‌ها در ابعاد ۲۰ الی ۳۰ نانومتر است. متوسط فاصله پویش آزاد مولکولی در فشار اتمسفر حدود ۷۰ نانومتر است و در نانو حفره‌های کوچک‌تر مولکول‌های هوا امکان جابه‌جایی آزاد ندارد. این دو خصوصیت سبب می‌شود تا ضریب انتقال هدایتی حرارت و انتقال حرارت جابه‌جایی در آبروژل‌ها بسیار کندتر از عایق‌های رایج با حفره‌های میلیمتری یا میکرومتری باشد [۲۱ و ۲۲].

در شکل (۶) ایزوترم جذب و دفع نیتروژن در آنالیز BET و توزیع اندازه حفره‌های آبروژل مورد استفاده بر اساس آنالیز BJH ارائه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، ایزوترم از نوع IV هستند که از مشخصات مواد مزوحفره (۵۰-۲ nm) است. شکل حلقه هیستریسیس در چرخه دفع به شکل حفره‌های موجود در ماده بستگی دارد. حلقه هیستریسیس مشاهده شده نیز بر اساس دسته‌بندی IUPAC از نوع H1 هستند که نشانگر وجود ماده‌ای متخلخل هستند با توزیع حفره‌های نسبتاً یک‌نواخت شبه‌استوانه‌ای که ساختار باز و به هم پیوسته‌ای دارند [۲۳]. توزیع اندازه حفره‌های به دست آمده نشان می‌دهد که حدود ۷۵٪ حجم حفره‌ها مربوط به حفره‌های با اندازه ۱۰-۵۰ nm است. نتایج آنالیز BJH تخلخل بسیار بالا (۴/۴ cm³/g) و سطح ویژه بزرگ (۴۸۱ m²/g) را برای آبروژل‌های تولید شده نشان دادند. چگالی ظاهری سیلیکا آبروژل تولید شده ۸۵ kg/m³ و چگالی پتوی آبروژلی تولید شده ۲۰۲ kg/m³ است.



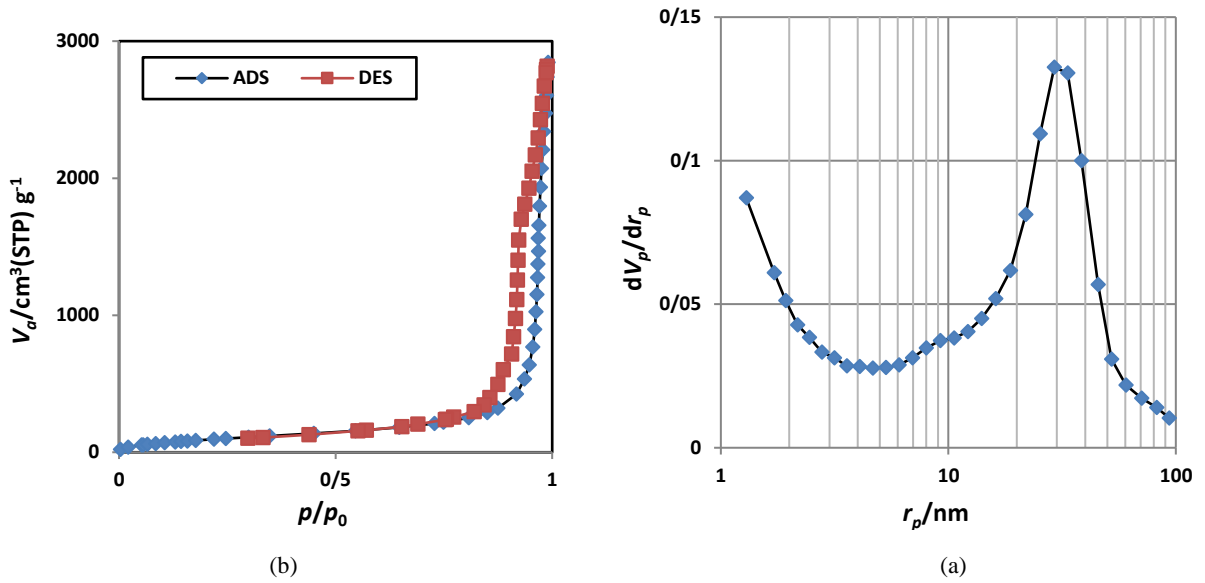
شکل ۵. ساختار کلی کامپوزیت‌های تهیه شده با پتوی آبروژل.

Figure 7. The structure of the prepared composites containing aerogel blanket.

جدول ۱. نمونه کامپوزیت‌های تهیه شده برای آزمون میدانی با مواد پراثرژی.

Table 1. Composite samples for field testing with energetic materials.

Sample	Outer side	Skin side	Blanket
1			3mm aerogel blanket with low stitching
2			6mm aerogel blanket with high stitching

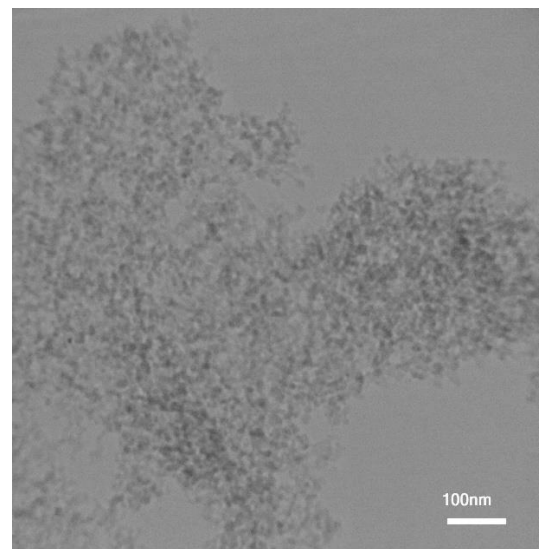
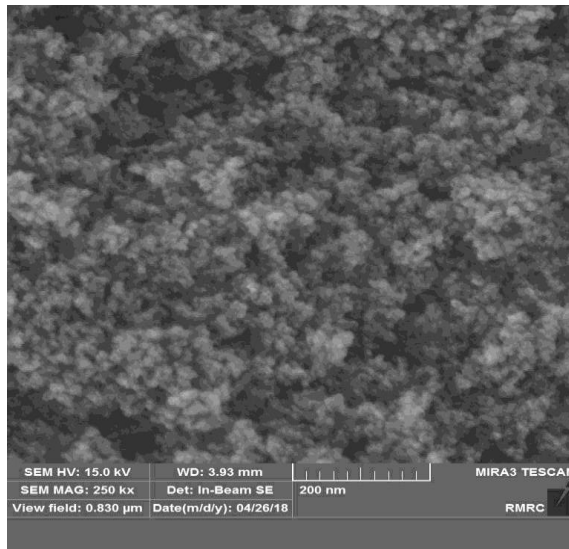


شکل ۶. (a) ایزوترم جذب و دفع نیتروژن و (b) نمودار BJH آبروژل سیلیکایی به‌کاررفته.

Figure 7. (a) N_2 isotherm and (b) BJH plot of used silica aerogels.

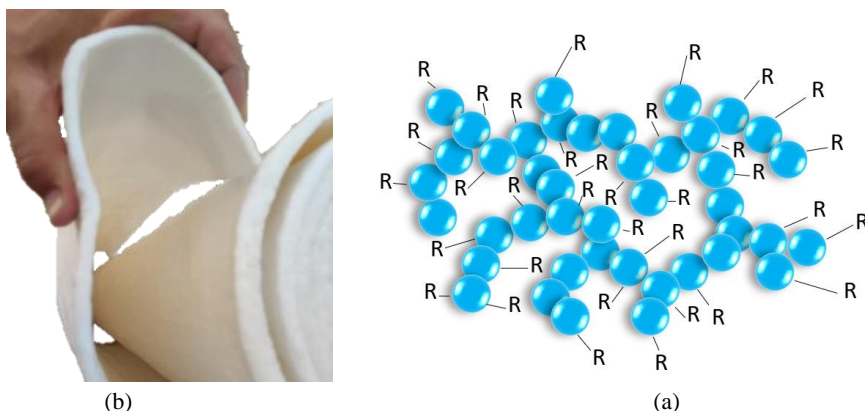
سه‌بعدی نانومتخلخل با ساختار باز را برای آبروژل سنتز شده نشان می‌دهند که با نتایج BET تطابق دارد. ساختار نانومتری و پتوی واقعی آبروژل در شکل (۸) نشان داده شده است. گروه‌های عاملی نشان داده شده با R نشانگر لیگاندهای آلی بر روی آبروژل هستند که سبب ضد آب بودن و طول عمر بالای آن‌ها می‌شوند.

در شکل (۷) تصاویر TEM و FESEM مربوط به آبروژل‌های سیلیکایی استفاده شده در این تحقیق آمده است. بر اساس تصویر FESEM پیداست که آبروژل حاصل از ذرات نسبتاً یک‌نواخت با اندازه‌های کوچک‌تر از ۱۰ nm و حفره‌های عموماً کوچک‌تر از ۵۰ nm تشکیل شده است. تصاویر TEM توزیع اندازه ذرات یک‌نواخت کوچک‌تر از ۱۰ nm را نشان می‌دهد. تصاویر شبکه



شکل ۷. تصاویر TEM و FESEM آبروژل سیلیکایی به‌کاررفته.

Figure 7. TEM and FESEM images of used silica aerogels.



شکل ۸. (a) ساختار نانومتخل آبروژل سیلیکایی با نانوذرات (۵nm-) جسبیده به هم با حفره‌های ۲۰ الی ۳۰ نانومتر و (b) پتوی منعطف آبروژل مورد استفاده.

Figure 9. (a) Microstructure of silica aerogel with ~5nm nanoparticles with pore size of 20-30 nm and (b) the used flexible aerogel blanket.

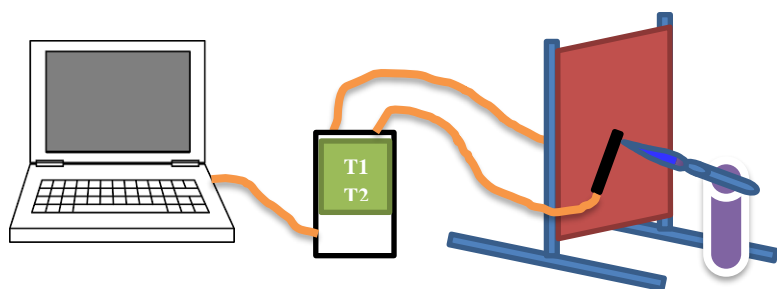
۲-۳ تست آزمایشگاهی کامپوزیت‌ها

متوسط ۵۰۰، ۷۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سلسیوس علامت‌گذاری و حرارت داده شده‌است (شکل (۱۰)). باتوجه به دماهای بالا و حساسیت شعله، دماهای ذکر شده به‌طور متوسط است و امکان ثابت نگه داشتن دقیق دما میسر نیست.

در شکل (۱۱) نتایج آزمون حرارتی آزمایشگاهی برای کامپوزیت آبروژل با ضخامت ۳ میلی‌متر در دمای متوسط سطح داغ ۵۰۰ درجه سلسیوس ارائه شده که به ترتیب زمان رسیدن به دماهای آستانه درد (۴۴ درجه سلسیوس) ۷۵ ثانیه، درجه اول سوختگی (۴۸ درجه سلسیوس) ۸۰ ثانیه، درجه دوم سوختگی (۵۵ درجه سلسیوس) ۸۸ ثانیه و سوختگی کامل (۷۲ درجه سلسیوس) ۱۰۵ ثانیه حاصل شده‌است. بر این اساس زمان کافی برای فرار در هنگام حریرق بدون سوختگی خاص در این حالت با استفاده از کامپوزیت آبروژل فراهم است.

برای تست آزمایشگاهی نمونه لایه‌های آبروژلی، از شعله مستقیم در فواصل مختلف برای ایجاد دماهای مشخصی استفاده می‌شود. دمای ۵۰۰، ۷۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سلسیوس به‌صورت پایدار ایجاد می‌شود و شیت‌های مختلف که دماسنج در یک طرف آن‌ها نصب شده، مستقیماً در مجاورت این دما قرار می‌گیرند. لایه‌ها مدت زمان مشخصی در مجاورت شعله قرار می‌گیرند و دماهای دو طرف کامپوزیت آبروژل به وسیله دماسنج و دیتالاگر ثبت و در رایانه رسم و تحلیل می‌شوند (شکل (۹)). دیتالاگر با بازه دیتاگیری هر ثانیه یک بار و با دقت یک درجه سلسیوس تا دمای ۱۰۰۰ درجه سلسیوس است. در این روش شعله به‌طور مستقیم و با فشار از راه تورچ به سطح نسوز کامپوزیت آبروژل می‌رسد.

چنان‌که در شکل (۱۰) نشان داده شده، سه قسمت مشخص از کامپوزیت آبروژل با ضخامت ۳ میلی‌متر برای حرارت‌دادن در دماهای

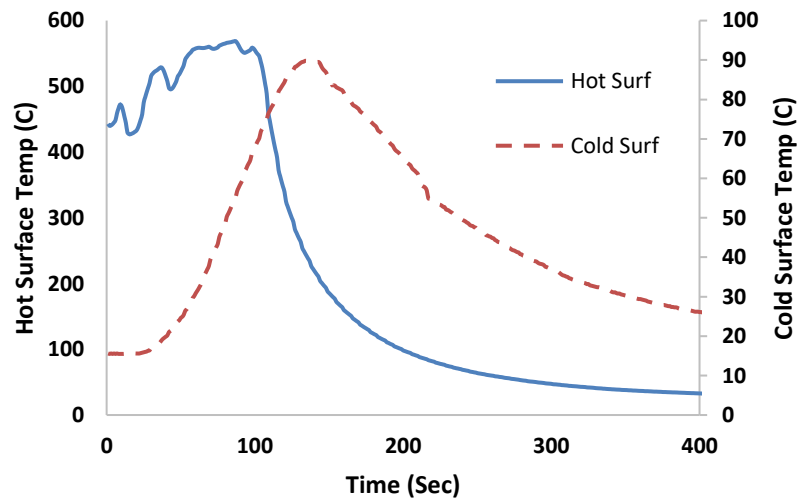


شکل ۹. طرحواره تست حرارتی عایق‌های نانوکامپوزیت آبروژل.

Figure 10. Schematic of experimental testing of aerogel composite insulation.



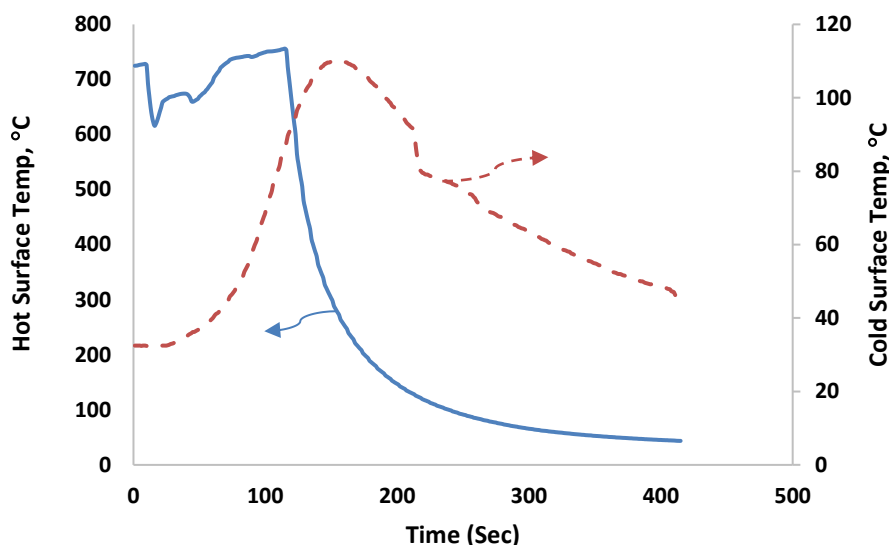
شکل ۱۰. آزمون‌های شعله مستقیم انجام شده در دماهای مختلف بر روی کامپوزیت آبروژل با ضخامت ۳ میلی‌متر منعطف.
Figure 11. Testing of the aerogel composite with 3mm thickness at different temperatures.



شکل ۱۱. تغییرات دمای سطح سرد با اعمال دمای سطح داغ ۵۰۰ °C. دمای سمت سرد بعد از ۷۵ ثانیه به ۴۴°C می‌رسد.
Figure 11. Cold surface temperature changes for the case of the hot surface temperature is 500°C. Cold surface temperature reaches 44°C after 75s.

در شکل (۱۲) نتایج آزمون حرارتی آزمایشگاهی برای کامپوزیت آبروژل با ضخامت ۳ میلی‌متر در دمای متوسط سطح داغ ۷۰۰ درجه سلسیوس ارائه شده‌است که به ترتیب زمان رسیدن به دماهای آستانه درد (۴۴ درجه سلسیوس) ۶۹ ثانیه، درجه اول سوختگی (۴۸ درجه سلسیوس) ۷۷ ثانیه، درجه دوم سوختگی (۵۵ درجه سلسیوس) ۸۸ ثانیه و سوختگی کامل (۷۲ درجه سلسیوس) ۱۰۳ ثانیه به دست آمده‌است. بر این اساس زمان کافی برای فرار در هنگام حریق بدون سوختگی خاص در این حالت بالاستفاده از کامپوزیت آبروژل فراهم است.

در شکل (۱۲) نتایج آزمون حرارتی آزمایشگاهی برای کامپوزیت آبروژل با ضخامت ۳ میلی‌متر در دمای متوسط سطح داغ ۷۰۰ درجه سلسیوس ارائه شده‌است که به ترتیب زمان رسیدن به دماهای آستانه درد (۴۴ درجه سلسیوس) ۶۹ ثانیه، درجه اول سوختگی (۴۸ درجه سلسیوس) ۷۷ ثانیه، درجه دوم سوختگی (۵۵ درجه سلسیوس) ۸۸ ثانیه و سوختگی کامل (۷۲ درجه سلسیوس) ۱۰۳ ثانیه به دست آمده‌است. بر این اساس زمان کافی برای فرار در هنگام حریق بدون سوختگی خاص در این حالت بالاستفاده از کامپوزیت آبروژل فراهم است.

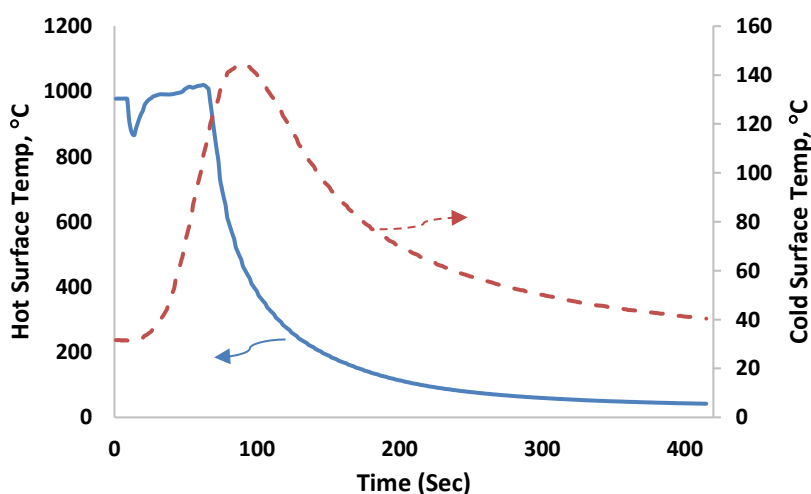


شکل ۱۲. تغییرات دمای سطح سرد با اعمال دمای سطح داغ 700°C ، دمای سمت سرد بعد از ۶۹ ثانیه به 44°C می‌رسد.

Figure 12. Cold surface temperature changes for the case of the hot surface temperature is 700°C . Cold surface temperature reaches 44°C after 69s.

بدون سوختگی خاص در این حالت با استفاده از کامپوزیت آبروژل نیز فراهم است. مشاهده می‌شود که در این دما پارچه نسوز رویی دچار تجزیه و تخریب و متعاقباً ذوب شده‌است. از بین رفتن این لایه و ذوب شدن تدریجی لایه پتوی آبروژل سبب می‌شود تا افزایش دمای سریع‌تری اتفاق بیافتد. با این وجود هنوز قبل از رسیدن به دمای سوختگی زمان کافی برای فرار از حریق ایجاد می‌شود.

در شکل (۱۳) نتایج آزمون حرارتی آزمایشگاهی برای کامپوزیت آبروژل با ضخامت ۳ میلیمتر در دمای متوسط سطح داغ 1000°C درجه سلسیوس ارائه شده‌است که به ترتیب زمان رسیدن به دماهای آستانه درد (44°C درجه سلسیوس) ۳۷ ثانیه، درجه اول سوختگی (48°C درجه سلسیوس) ۳۹ ثانیه، درجه دوم سوختگی (55°C درجه سلسیوس) ۴۲ ثانیه و سوختگی کامل (72°C درجه سلسیوس) ۵۰ ثانیه است. بر این اساس زمان کافی برای فرار در هنگام حریق



شکل ۱۳. تغییرات دمای سطح سرد با اعمال دمای سطح داغ 1000°C ، دمای سمت سرد بعد از ۳۷ ثانیه به 44°C می‌رسد.

Figure 13. Cold surface temperature changes for the case of the hot surface temperature is 1000°C . Cold surface temperature reaches 44°C after 37s.

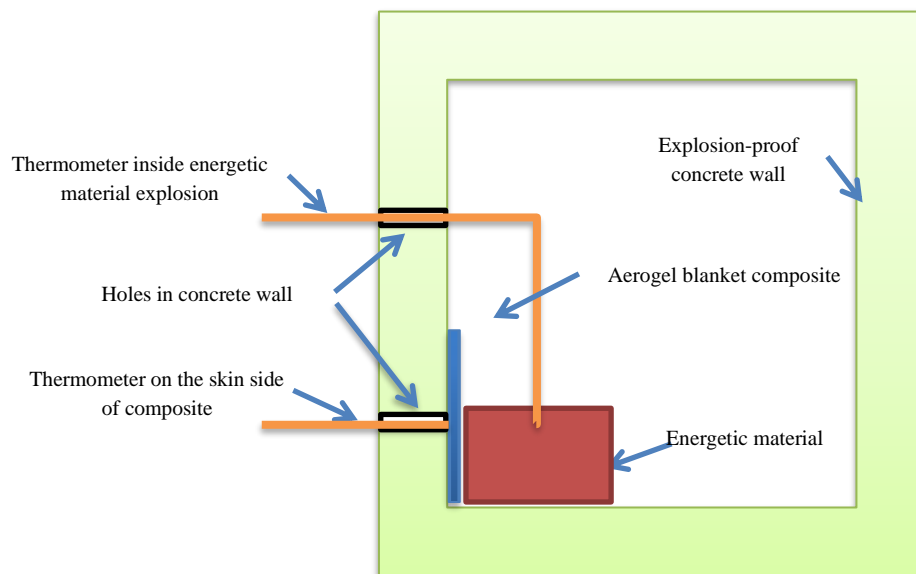
مستقیم با کامپوزیت آبروژل به ضخامت ۳ میلیمتر قرار گرفته و با دماسنج دمای سطح سرد کامپوزیت اندازه‌گیری شد (شکل (۱۵)). نتایج نشان داد که دمای سطح سرد به کمتر از ۳۹ درجه سلسیوس می‌رسد. زمان حریق مواد پرانرژی نسبتاً سریع است و در حدود ۱۱ ثانیه حریق به پایان می‌رسد. دمای سطح گرم که با ترموکوپل غلافدار اندازه‌گیری می‌شود، به حدود ۴۸۵ درجه سلسیوس می‌رسد. باتوجه به زمان نسبتاً کم شعله و حساسیت پایین دماسنج غلافدار، دمای ۴۸۵ درجه سلسیوس اندازه‌گیری شده کمیته مقدار است و دمای واقعی سطح پتو بالاتر از این دما خواهد بود. پارچه نسوز استفاده شده بر روی کامپوزیت آبروژل در برخی نقاط، تخریب می‌شود؛ ولی عایق پتو آسیبی نمی‌بیند. این آزمون برای نمونه‌های مختلف در چندین مرحله تکرار شد و دمای طرف دوم شیت‌ها در تمامی آزمایش‌ها مقداری پایین‌تر از ۳۹ درجه سلسیوس داشتند. باتوجه به نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی و آزمایش‌های میدانی می‌توان نتیجه گرفت که عایق‌های آبروژل، گزینه مطمئن و مناسبی برای استفاده در پوشاک و تجهیزات در حوزه مواد پرانرژی است و مانع از ایجاد آسیب‌های جدی به نفرات و تجهیزات خواهد شد.

۳-۳ تست میدانی کامپوزیت آبروژل منعطف نانومتخلخل با مواد پرانرژی صنعتی

در آزمون‌های میدانی نمونه کامپوزیت‌ها در ابعاد ۵۰ در ۵۰ سانتیمتر و در ضخامت‌های مختلف همانند جدول، بر روی مواد پرانرژی در مقادیر مشخص قرار گرفته و با استفاده از سیم‌های کندسوز حریق لازم ایجاد می‌شود. با استفاده از دماسنج‌هایی که در دو طرف لایه‌ها قرار داده شده است، دماها اندازه‌گیری و گزارش می‌شوند (شکل (۱۴)). باتوجه به این که در کامپوزیت‌های ضخیم‌تر از ۳ میلیمتر هیچ‌گونه افزایش دمایی مشاهده نشد، لذا نتایج اندازه‌گیری برای کامپوزیت با ضخامت ۳ میلیمتر گزارش می‌شود و کامپوزیت‌های ضخیم‌تر انتقال حرارت کمتری داشتند.

باتوجه به محدودیت‌های جابه‌جا کردن کامپیوتر و دیتالاگر در محل تست میدانی، اندازه‌گیری دماها به صورت نقطه‌ای است و بیشینه دمای سطح گرم و سطح سرد کامپوزیت آبروژل برای نازک‌ترین نمونه گزارش شده است.

در آزمون‌های میدانی ۹ نمونه کامپوزیت آبروژل ارزیابی شد که بر اساس محدودیت تصاویر برخی از آن‌ها نشان داده شده است. در این آزمایش‌ها بیش از یک کیلوگرم ماده پرانرژی در تماس



شکل ۱۴. طرحواره نحوه قرار دادن کامپوزیت آبروژل در معرض انفجار مواد پرانرژی و اندازه‌گیری دما.
 Figure 15. Schematic of the field testing of the aerogel composite exposed to the energetic material explosion.



شکل ۱۵. شعله‌ور شدن حریق مواد پرانرژی در تماس مستقیم با کامپوزیت عایق آبروژل، هیچ‌گونه تخریب یا افزایش دمای آسیب‌زننده در طرف دیگر کامپوزیت مشاهده نشد.

Figure 15. Aerogel composite directly exposed to explosion of the energetic material. No destruction or damaging temperate rise was observed on the other surface of the composite.

مراجع

- [1] Gurav, J. L., Jung, I., -K., Park, H. -H., Kang, E. S., Nadargi, D. Y. (2010). Silica Aerogel: Synthesis and Applications. *Journal of Nanomaterials*, 409310: 1-11.
- [2] Yousefi Amiri, T., Bargozin, H., Moghaddas, J. S. (2020). A Review on the Silica Aerogels-Supported Catalysts. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 19: 49-69.
- [3] Shahzamani, M., Masoomi, M., Bagheri, R. (2015). Synthesis of Organic Aerogels and Factors Affecting on their Structure. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 14: 6-16, In Persian.
- [4] Heinrichs, B., Lambert, S., Job, N., Pirard, J. P. (2007). Sol-Gel Synthesis of Supported Metals”, in *Catalyst preparation: Science and Engineering*, Ed. J. Regalbuto, Boca Raton, CRC Press: Taylor & Francis Group.
- [5] Abrishami, F., Pourmosavi, S. A., Zohari, N. (2018). Melt-Cast Explosives: Properties and Applications. *Journal of Energetic Materials*, 14: 1-13, In Persian.
- [6] Song, G., Mandal, S., Rossi R. (2016). *Thermal Protective Clothing for Firefighters*. Woodhead Publishing, Elsevier.
- [7] Horrocks, A. R., Anand, S. C. (2016). *Handbook of Technical Textiles: Technical Textile Applications*. 2nd Edition, Woodhead Publishing, Elsevier.
- [8] Du, Y., Kim, H.-E. (2022). Research trends of the application of aerogel materials in clothing. *Fashion and Textiles*, 9: 23.
- [9] Kilinc, F. S. (2013). *Handbook of Fire Resistant Textiles*. Woodhead Publishing, Elsevier.

۴. نتیجه‌گیری

عایق‌های پتوی منعطف آبروژل نانومتخلخل دارای خصوصیات منحصربه‌فردی هستند که سبب می‌شود بتوان از آن‌ها در ضخامت بسیار کم، برای بهبود کارایی لباس‌های ضد حریق و مقاوم در برابر آتش و مواد پرانرژی استفاده کرد. در حریق‌های مواد پرانرژی نیاز است تا به مدت ۱۰ الی ۳۰ ثانیه نفرات برای فرار از حریق بدون سوختگی زمان داشته‌باشند. نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی و میدانی در دماها و شرایط مختلف نشان می‌دهد که کامپوزیت‌های آبروژل قابلیت جلوگیری از رسیدن به دمای حدود ۴۴ درجه سلسیوس را برای مدت زمان‌های بیشتر از حداقل مورد نیاز دارند. همچنین انعطاف کافی پتوی آبروژل با ضخامت ۳ میلیمتر، ضد حریق بودن و قابلیت تنفس و ضد آب بودن از خصوصیات هستند که پتوهای آبروژل را گزینه مناسبی برای تولید لباس و سایر منسوجات نظامی می‌کند. در آزمون‌ها مشاهده شد که پتوهای آبروژل توانایی تحمل دمای بالای ۱۰۰۰ درجه سلسیوس را برای مدت زمان زیادی دارند و واجد قدرت محافظت از سوختگی در سمت دیگر بلکنت‌ها هستند.

۵. تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از مرکز توسعه مواد شیمیایی بابت حمایت مالی پروژه و نیز از آقای دکتر نصرت‌زادگان قدردانی می‌کنند.

- [10] Kim, H. H., Park, P. K., Kim, Y. S., Hong, S. T. (2018). Study on the Weight Reduction of Firefighter's Protective Clothing by Using Air Layer and Aerogels. *Fire Science and Engineering*, 32: 81-88.
- [11] Midha, V., Mukhopadhyay, A. (2021). Recent Trends in Traditional and Technical Textiles. *Select Proceedings of ICETT 2019*. Springer Singapore.
- [12] Song, G., Wang, F. (2019). Firefighters' Clothing and Equipment: Performance, Protection, and Comfort. 1st Edition, CRC Press.
- [13] Guo, C., Huang, D. (2017). Thermal Protective Performance of Silica Aerogel Felt-bedded Firefighters' Protective Clothing under Fire Conditions. *Materials Science*, 23: 335-341.
- [14] Chakraborty, S., Rao, A. V., Kothari, V. K., Pisal, A. A. (2019). Radiant heat protective performance of clothing assemblies with flexible aerogel-Nomex nonwoven composite as thermal insulation. *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, 44(4): 396-403.
- [15] Shaid, A., Wang, L., Padhye, R., Bhuyian, M. A. R. (2018). Aerogel nonwoven as reinforcement and batting material for firefighter's protective clothing: a comparative study. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 87(1): 95-104.
- [16] Zhang, H., Song, G., Su, H., Ren, H., Cao, J. (2017). An exploration of enhancing thermal protective clothing performance by incorporating aerogel and phase change materials. *Fire and Materials*, 41(8): 953-963.
- [17] Jin, L., Hong, K., Yoon, K. J. (2013). Effect of Aerogel on Thermal Protective Performance of Fire-Fighter Clothing. *Journal of Fiber Bioengineering and Informatics*, 6: 315-324.
- [18] Fathollahi, M., Hosseini, S. Gh., Hosseini, S. M. J. (2017). Risk Assessment of Electrostatic Discharge and its Mitigations. *Journal of Energetic Materials*, 13: 3-14, In Persian.
- [19] Talebi, F., Vaziri, S. A., Nasimi, A. (2018). Consideration of Effective Factors on the Mechanical Sensitivity of Explosives. *Journal of Energetic Materials*, 14: 47-60, In Persian.
- [20] Seyfollah Zadeh, A., Fathollahi, M., Mirshekari, A., Khosravi, S. (2013). Determination Methods for Thermal Safety Parameters of Energetic Materials by Differential Scanning Calorimetry (DSC). *Journal of Energetic Materials*, 9: 40-50, In Persian.
- [21] Yousefi Amiri, T., Bargozin, H., Farhadipoor, M., Jamali, Z. (2021). Silica Aerogel-Filled Polycarbonate Planes: Innovative Energy-Efficient Daylighting Systems in Different Buildings. *Nashrieh Shimi va Mohandesi Shimi Iran*, 40(1): 349-358, In Persian.
- [22] Demko, J., Fesmire, J. E., Shu, Q. S. (2022). Cryogenic Heat Management: Technology and Applications for Science and Industry. 1st Edition, CRC Press.
- [23] Bhagat, S.D., Kim, Y. H., Moon, M. J., Ahn, Y. S., Yeo, J. G. (2007). A cost-effective and fast synthesis of nanoporous SiO₂ aerogel powders using water-glass via ambient pressure drying route. *Solid State Sciences*, 9: 628-635.