

Simulation of Thermal Response of Ultralight Porous Ablative Insulators Based on Carbon Aerogels

Mohammad Mehdi Seraji^{1*} and Ahmad Arefazar²

1. Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Postal Code: 6135783151, Ahvaz, Iran
2. Department of Polymer Engineering and Color Technology, Amirkabir University of Technology, Postal Code: 15875-4413, Tehran, Iran

Received: 6 July 2025, accepted: 30 November 2025

ABSTRACT

Hypothesis: In recent years, porous carbon-phenolic ablators have attracted attention for special aerospace missions due to the capability of the structural and density tuning to achieve a balance between ablation and insulation performance under thermal-aerodynamic conditions. Phenolic resin-impregnated carbon aerogels with a three-dimensional, interconnected nanoporous network structure, very low density, and special insulation properties are a novel type of lightweight carbon-phenolic ablators. Also, the development of mathematical models and simulation of thermal response of ablative insulators, appropriate to their structure is carried out with the aim of predicting the temperature and density distribution in the ablator depth. The theoretical results ultimately lead to the determination of the optimal insulation thickness for the application conditions.

Methods: Novel types of ultralight carbon-phenolic composites based on carbon aerogels with low density in the range of 0.36 to 0.76 g/mL were fabricated. After defining a mathematical model to predict the temperature distribution and depth density of the ablators, the model input data such as thermal degradation kinetic parameters and thermophysical properties were estimated using TGA and recession rate analysis. Also, the microstructure of the ablator material was investigated using scanning electron microscopy during the ablation process. Then, the ablation process of the prepared thermal insulators was simulated using the commercial software Comsol Multiphysics based on the 1-D mathematical model.

Findings: The results showed that increasing the density of the ablator from 0.36 to 0.76 g/mL helped to decrease the surface and the depth temperatures of the ablator. The depth temperature of the ablators with a density of 0.36 g/cm³ at the depth of 25 and 35 mm was 100°C and 65°C, respectively. The in-depth temperatures decreased (80°C at 25 mm and 58°C at 35 mm) for the ablator with the density of 0.76 g/mL. The surface recession rate also decreased from 0.091 to 0.055 mm/s with the density increase. Lightening of the ablators caused the occurrence of the in-depth ablation phenomenon, while for the ablators with higher density, pyrolysis and ablation occurred in the surface region. Comparison of simulation and experimental results indicated that the thermal behavior of phenolic impregnated carbon aerogel ablators was predicted favorably using the developed computer program. Using the developed computer program, the ablator density and the required thickness of thermal insulator could be estimated for each application condition.

Keywords:

porous composite ablator,
carbon aerogel,
ablation,
phenolic resins,
insulation properties

(*To whom correspondence should be addressed.

E-mail: mm.seraji@scu.ac.ir

Please cite this article using:

Seraji M.M. and Arefazar A., Simulation of Thermal Response of Ultralight Porous Ablative Insulators Based on Carbon Aerogels, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **38**, 149-165, 2025.

شبیه‌سازی پاسخ گرمایی عایق‌های فداشونده فراسبک متخلخل بر پایه ابروژل‌های کربنی

محمد مهدی سراجی^{۱*}، احمد عارف‌آذر^۲

۱- اهواز، دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی، کد پستی ۶۱۳۵۷۸۳۱۵۱

۲- تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، کد پستی ۱۵۸۷۵-۴۴۱۳

دریافت: ۱۴۰۴/۴/۱۵، پذیرش: ۱۴۰۴/۹/۹

چکیده

فرضیه: در سال‌های اخیر، فداشونده‌های متخلخل کربن-فنولی، به دلیل قابلیت مهندسی ساختاری و تنظیم چگالی به منظور دستیابی به تعادل میان فداشوندگی و کارایی عایقی در شرایط گرمایی-آیروپدینامیکی، برای ماموریت‌های فضایی ویژه مورد توجه قرار گرفته‌اند. ابروژل‌های کربنی آغشته به رزین فنولی با ساختار شبکه‌ای سه‌بعدی نانومتخلخل و به هم پیوسته، چگالی بسیار کم و خواص عایقی ویژه، نمونه‌ای جدید از فداشونده‌های کربن-فنولی سبک هستند. همچنین، توسعه مدل‌های ریاضی و شبیه‌سازی رفتار گرمایی عایق‌های فداشونده، متناسب با ریزساختار آن‌ها و با هدف پیش‌بینی توزیع دما و چگالی در عمق فداشونده انجام می‌گیرد. نتایج نظری حاصل در نهایت به تعیین ضخامت بهینه عایق برای شرایط کاربری منجر می‌شود.

روش‌ها: در این پژوهش، نمونه‌هایی نوین از کامپوزیت‌های فراسبک کربن-فنولی بر پایه ابروژل‌های کربنی با چگالی کم در محدوده 0.36 g/cm^3 تا 0.76 g/cm^3 ساخته شدند. پس از تعریف مدل ریاضی برای پیش‌بینی توزیع دما و چگالی عمقی فداشونده‌ها، داده‌های ورودی مدل مانند پارامترهای سینتیکی تخریب گرمایی و خواص گرمافیزیکی نمونه‌ها با استفاده از آزمون گرماوزن‌سنجی و پس‌روی سطحی تخمین زده شدند. همچنین، ریزساختار فداشونده با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی حین فداش بررسی شد. سپس، شبیه‌سازی فرایند فداش عایق‌های گرمایی تهیه‌شده به وسیله نرم‌افزار تجاری Comsol Multiphysics انجام شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد، افزایش چگالی فداشونده از 0.36 g/cm^3 به 0.76 g/cm^3 سبب کاهش دمای سطح فداشونده و دماهای عمقی می‌شود. دمای عمقی فداشونده با چگالی 0.36 g/cm^3 در عمق ۲۵ و ۳۵ mm به ترتیب 100°C و 65°C بود که برای فداشونده با چگالی 0.76 g/cm^3 به 80°C و 58°C کاهش یافت. همچنین، سرعت پس‌روی سطحی از 0.91 mm/s به 0.55 mm/s کاهش یافت. سبک‌سازی فداشونده‌های تهیه‌شده، سبب رخداد پدیده فداش عمقی شد، در حالی که برای فداشونده سنگین‌تر، تفکافت (گرماتجزیه) و فداش در ناحیه سطحی اتفاق می‌افتد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی حاکی از پیش‌بینی مطلوب رفتار گرمایی فداشونده‌های بر پایه ابروژل کربنی آغشته به رزین فنولی با استفاده از برنامه رایانه‌ای نام‌برده بود. با استفاده از برنامه رایانه‌ای توسعه‌یافته، می‌توان برای هر شرایط کاربری، چگالی فداشونده و ضخامت مورد نیاز عایق گرمایی را تخمین زد.

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

mm.seraji@scu.ac.ir

واژه‌های کلیدی

فداشونده متخلخل کامپوزیتی،

ابروژل کربنی،

فداشوندگی،

رزین‌های فنولی،

خواص عایقی

مقدمه

ماموریت‌های اکتشافی فضایی همواره با ورود پرتابه‌ها و سفینه‌ها به جو زمین با سرعت‌های فراصوت همراه هستند. هنگام ورود به جو زمین، انرژی سینتیکی بسیار زیاد در اطراف پرتابه به گرما تبدیل شده و به وسیله سازوکارهای تابش و جابه‌جایی به سطح پرتابه منتقل می‌شود. در سرعت‌های بیش از 8 km/s ، شار گرمایی انتقال یافته به سطح به $1/5 \text{ MW/m}^2$ افزایش می‌یابد [۱]. در این شرایط استفاده از ساختارهای فداشونده به‌عنوان سامانه‌های حفاظت گرمایی ضروری است. ساختارهای فداشونده با مصرف انرژی از راه تغییر فاز، واکنش‌های شیمیایی و کاهش وزن مواد، تجهیزات حساس همچون حافظه‌های دارای تصاویر و اطلاعات، فضایی را از معرض دما و شار گرمایی شدید حفظ می‌کنند [۲].

فداشونده‌های پلیمری مانند نانوکامپوزیت‌های پلیمری، فداشونده‌های کربنی آغشته به رزین‌های فنولی و فداشونده‌های کامپوزیتی پلیمر-الیاف به دلیل قابلیت مهندسی و تنظیم متغیرهایی همچون چگالی، مقاومت در برابر شوک‌های گرمایی، مقاومت مکانیکی و عایق گرمایی مطلوب و قیمت کم از جمله سامانه‌های حفاظت گرمایی هستند که در دهه‌های اخیر در صنایع هوافضا مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته‌اند [۳-۵]. این مواد کامپوزیتی در کاربردهای مختلف همچون سدگری گرمایی سطوح آیرودینامیکی و ساختارهای محافظ پیش‌ران در فضاپیماها و موشک‌ها استفاده می‌شوند. با وجود پیشرفت‌های گسترده در زمینه بهبود خواص ماتریس‌های پلیمری در ساختارهای فداشونده، وجود برخی کاستی‌ها، تلاش پژوهشگران را به خود معطوف کرده است. کارایی فداشوندگی کم، استحکام کم زغال برجای مانده [۶]، چگالی و رسانندگی گرمایی زیاد [۷]، اختلاف ضرایب خواص فیزیکی و شیمیایی تقویت‌کننده‌ها (الیاف و نانوذرات) با ماتریس پلیمری [۸]، مقدار پسروری زیاد و نبود پایداری گرمایی در شار گرمایی زیاد [۹] را می‌توان از این نواقص برشمرد. در این میان، تهیه فداشونده‌های با حداقل ضخامت، چگالی و رسانندگی گرمایی هم‌زمان با حداکثر کارایی فداشوندگی روند پژوهش‌های اخیر و آینده است.

فداشونده‌های متخلخل کربنی آغشته به رزین‌های فنولی به‌عنوان کاربردی‌ترین گروه از فداشونده‌های سبک اولین بار توسط Tran [۱۰]، Desai [۱۱] و Willcockson [۱۲] و با هدف کاهش وزن و رسانندگی گرمایی فداشونده‌های پلیمری توسعه یافتند و تلاش‌ها در زمینه بهبود و تحلیل کارایی آن‌ها در حال انجام است. این ساختارها به وسیله آغشته‌سازی پیش‌ساخته متخلخل الیاف کربنی با رزین‌های فنولی تهیه می‌شوند. چگالی این فداشونده‌ها به وسیله کنترل مقدار رزین

آغشته‌ساز در محدوده $0/2 \text{ g/cm}^3$ تا $1/3 \text{ g/cm}^3$ تنظیم‌پذیر است. Suzuki [۱۳]، Okuyama [۱۴] و Szasz [۱۵] نمونه‌های دیگری از فداشونده‌های سبک را به وسیله لایه‌گذاری صفحه‌های ساخته‌شده از الیاف کربن آغشته به رزین فنولی با چگالی قابل کنترل تهیه کردند. Pavesi و همکاران [۱۶] نیز فداشونده‌های فراسبک بر پایه پیش‌ساخته کربنی تجاری از الیاف کوتاه کربنی آغشته به رزین فنولی، را ساخته و ارزیابی کردند. Wang [۱۷] و Cheng [۱۸] اثر آغشته‌سازی کامپوزیت‌های کربن-کربن متخلخل به ایروزل‌های فنولی بر کارایی فداشوندگی-عایقی نمونه‌های نام‌برده را بررسی کردند. بر مبنای پژوهش‌های انجام‌شده پسروری سطحی فداشونده‌های متخلخل بر پایه پیش‌ساخته‌های الیاف کربنی، با پیشرفت تخریب گرمایی رزین حین اعمال شار گرمایی و از دست رفتن پیوستگی ساختاری، به دلیل کنده شدن گرمایی-مکانیکی الیاف در سطح فداشونده تسریع می‌شود [۱۹]. Kubota و همکاران با استفاده از یک اسفنج کربنی با شبکه سه‌بعدی به هم پیوسته و آغشته به رزین پلیمری افزون بر سبک‌سازی فداشونده و ایجاد خواص عایقی مطلوب، این معضل را رفع کردند [۲۰].

ایروزل‌های کربنی نانوساختارهای سه‌بعدی با خواصی همچون مساحت سطح ویژه زیاد، چگالی بسیار کم، درصد تخلخل زیاد (۸۰٪) و بیشتر) و قابلیت مهندسی ساختار و اندازه حفره‌ها هستند. این ویژگی‌های منحصر به فرد توجه‌ها را به سمت استفاده از ایروزل‌های کربنی به‌عنوان مواد ایده‌آل در کاربردهای عایق گرمایی معطوف کرده است [۲۱]. ایروزل‌های کربنی از گرماکافت ایروزل‌های پلیمری تهیه می‌شوند. ایروزل‌های پلیمری نیز با استفاده از فرایند سل-ژل تهیه می‌شوند و با تنظیم عوامل کنترل‌کننده ریزساختار همچون غلظت اولیه سل، نوع کاتالیزگر، دما و سایر عوامل فرایندی و موادی فرایند سل-ژل امکان دستیابی به خواص نهایی مدنظر از جمله رسانندگی گرمایی مؤثر و سطح ویژه وجود خواهد داشت.

هم‌زمان با ساخت فداشونده‌های جدید و نوآورانه همچون فداشونده‌های فراسبک الیاف کربن آغشته به رزین فنولی، توسعه مدل‌های ریاضی جدید یا پیش‌بینی رفتار آن‌ها با مدل‌های موجود همراه است. مدل‌سازی ریاضی پدیده فدایش کامپوزیت‌های فداشونده با هدف اصلی پیش‌بینی توزیع دما در ساختار آن‌ها و در نتیجه انتخاب و تعیین ضخامت مناسب فداشونده انجام شده است. بر مبنای تقسیم‌بندی ارائه‌شده توسط Lachaud و همکاران [۱] کلیه کدها و شبیه‌سازی‌های انجام‌شده تا به حال را می‌توان در سه دسته کلی از نظر چگونگی انتقال گازهای حاصل از تف‌کافت مدنظر قرار داد: مدل‌های نسل اول؛ انتقال جرم ساده‌سازی‌شده، مدل‌های نسل دوم؛ معادله اندازه حرکت میانگین مانند قانون داریسی برای انتقال

حفره‌ها و تخلخل در ساختار فداشونده فنولی بررسی شده است. با توجه به پیشینه ارائه‌شده، روند استفاده از نرم‌افزارهای تجاری اجزای محدود و سیال‌های محاسباتی برای حل مسائل فداشوندگی کامپوزیت‌های عایق فداشونده به‌ویژه برای فداشونده‌های متخلخل و سبک، گریزناپذیر و در حال گسترش روزافزون است. انجام محاسبات سریع، قابلیت تعریف هندسه‌های مختلف و پیچیده در مختصات مختلف، کارایی این نرم‌افزارها را افزایش داده است. اما تاکنون مدل‌سازی‌های نام‌برده برای فداشونده‌های بر پایه ایروزل‌ها انجام نشده است. در پژوهش حاضر، در رویکرد نوآورانه، از ایروزل‌های کربنی با چگالی کم و تخلخل زیاد، به‌عنوان پیش‌ساخته کربنی در ساخت فداشونده‌های کربن-فنولی استفاده شد. تخلخل زیاد این پیش‌ساخته و قابلیت کنترل مقدار رزین آغشته‌ساز به درون حفره‌ها، امکان دستیابی به فداشونده‌های کربن-فنولی متخلخل و سبک با گستره چگالی کم تا زیاد را محیا می‌سازد. همچنین، با این روش، امکان بررسی انواع سازوکار فداشوندگی با تغییرات چگالی و تخلخل و نیز بررسی عملکرد گرمایی فداشونده قابل ردیابی خواهد بود. همچنین در این پژوهش، با پیاده‌سازی معادلات حاکم، فرایند فداشوندگی ایروزل کربنی آغشته به رزین، در نرم‌افزار تجاری Comsol شبیه‌سازی شد و نتایج تجربی با نتایج نظری حاصل از شبیه‌سازی مقایسه شد. با استفاده از این نرم‌افزار، می‌توان با تنظیم چگالی فداشونده، متناسب با دمای سطح و شار گرمایی سطحی، دمای پشت فداشونده را تخمین زد و بهترین فداشونده را برای کاربری ویژه انتخاب کرد.

مدل‌سازی ریاضی فرایند فداشوندگی متخلخل با استفاده از مدل‌های ریاضی نسل دوم

معادله بقای انرژی

با فرضیات ساده‌ساز در نظر گرفته‌شده معادله بقای انرژی برای یک جزء حجمی از فداشونده ایروزل کربنی آغشته به رزین فنولی یک معادله دیفرانسیل ناهمگن غیرخطی مطابق با معادله (۱) خواهد بود [۲۴]:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) - (\epsilon_g \rho_g c_{p,g} v_g) \cdot \nabla T - \partial \rho / \partial t \Delta H_p \quad (1)$$

در این معادله، ρ ، c_p ، k ، ϵ_g ، ρ_g ، v_g ، h_g و ΔH_p به ترتیب چگالی فداشونده، ظرفیت گرمایی ویژه فداشونده، ضریب انتقال گرمایی رسانندگی فداشونده، تخلخل فداشونده، چگالی گاز تف‌کافت، آنتالپی گازهای تف‌کافت، سرعت توده گاز و گرمای تخریب گرمایی پلیمر هستند. در معادله بقای انرژی مفهوم فیزیکی عبارت دو طرف تساوی را می‌توان به شکل زیر بیان کرد:

گازهای حاصل از تف‌کافت و مدل‌های نسل سوم؛ مدل‌های بر پایه شرایط شیمیایی/گرمایی غیرتعادلی.

در فداشونده‌های متخلخل به دلیل وجود حفره‌ها و ایجاد فشار داخلی درون ساختار ضروری است، از مدل‌های نوع دوم و سوم بهره گرفته شود. اخیراً به منظور بهبود کارایی و دقت مدل‌های ارائه‌شده استفاده از نرم‌افزارهای تحلیل تجاری‌سازی شده مانند Comsol، ABAQUS و OPENFOAM مورد توجه زیادی قرار گرفته و تحلیل‌های متعددی با در نظر گرفتن پدیده‌های مختلف فیزیکی-شیمیایی انجام شده است [۲۲-۲۴]. Lachaud و همکاران [۱] به منظور پیش‌بینی رفتار کامپوزیت‌های فداشونده کربنی آغشته به رزین فنولی (phenolic impregnated carbon ablator, PICA) از نرم‌افزار تجاری OPENFOAM توزیع دمای دقیق، مقدار پسروری ناشی از اکسایش، نیم‌رخ فشار و مقدار مولی گازهای حاصل از تف‌کافت را تخمین زدند. Kato و همکاران در دو پژوهش مجزا در سال‌های ۲۰۱۲ [۲۵] و ۲۰۱۹ [۲۶] مدل ریاضی و روش حل عددی آن را برای تخمین توزیع دما در فداشونده‌های سبک (lightweight ablator series for transfer vehicle systems, LATS) ارائه کردند. در این پژوهش‌ها مدل ارائه‌شده شامل معادلات موازنه جرم و انرژی با روش تفاضلات محدود حل شد. نتایج مدل‌سازی با نتایج تجربی حاصل از آزمون فداشوندگی نمونه‌های LATS تطابق خوبی داشت. Zhu و همکاران [۲۷] مدلی را برای تخمین توزیع دما در ساختار فداشونده ابرسبک بر پایه ساختار لانه زنبوری تقویت‌شده (honeycomb-reinforced lightweight ablator, HRLA) با استفاده از مدل فیزیکی-چندگانه توسعه دادند. این پژوهشگران به منظور حل هم‌زمان معادلات بقای انرژی، بقای جرم و بقای اندازه حرکت (سه معادله دیفرانسیل با مشتقات جزئی برای متغیرهای وابسته دما، فشار و چگالی) از نرم‌افزار تجاری Comsol بهره بردند. این نرم‌افزار با استفاده از روش اجزای محدود دستگاه معادلات دیفرانسیل مسئله چندفیزیکی را در دامنه مکانی و زمانی مدنظر حل می‌کند. آن‌ها تجزیه گرمایی رزین فنولی را در چهار ناحیه دمایی توصیف کرده و با چهار معادله آرنیوسی مجزا (چهار معادله دیفرانسیل معمولی) این نواحی را توصیف کردند. مقایسه توزیع دمای سطحی و عمقی حاصل از نتایج تجربی و مدل‌سازی حاکی از کارایی بسیار مطلوب برنامه طراحی شده برای پیش‌بینی پاسخ گرمایی سامانه‌های فداشونده بود.

در مطالعه دیگری Li و همکاران [۲۴] مدلی عددی را با استفاده از نرم‌افزار تجاری Comsol به منظور تخمین پاسخ گرمایی فداشونده‌های کامپوزیتی زغال‌گذار ارزیابی کردند. در این پژوهش، فداشوندگی سطحی و حجمی در مدل‌سازی در نظر گرفته شد و نیز اثر مهندسی توزیع

هنگام تف‌کافت رزین، به دلیل ایجاد گرادیان فشار در نواحی مختلف فداشونده جریان گازهای تف‌کافت در محیط متخلخل آن ایجاد می‌شود. در صورتی که جریان عبور گازهای تف‌کافت از فداشونده متخلخل آرام فرض شود و ساختار حفره‌های باز ایروزل حین عبور گازها تخریب نشود، برای فداشونده متخلخل، پدیده عبور گاز به کمک قانون داریسی معادله (۴) توجیه می‌شود و این قانون برای تخمین میانگین حجمی سرعت گاز در توده متخلخل استفاده می‌شود [۱۱، ۲۴، ۲۷]:

$$v_g = \frac{-\kappa}{\varepsilon_g \mu} \nabla P \quad (4)$$

در این معادله، v_g ؛ میانگین حجمی سرعت گاز، κ ؛ تراوایی، ∇P ؛ اختلاف فشار، μ ؛ گرانروی سیال و ε_g ؛ تخلخل فداشونده هستند. با در نظر گرفتن گازهای تف‌کافت به عنوان گاز کامل می‌توان معادله حالت گاز کامل معادله (۵) را برای ارتباط پارامترهای ترمودینامیکی فشار و دمای گازهای تف‌کافت به کار گرفت. در این معادله ρ_g ؛ چگالی گاز و M_g ؛ وزن مولکولی معادل مخلوط گاز هستند:

$$P = \frac{\rho_g R_u}{M_g} T \quad (5)$$

روش حل

مسئله فدایش ایروزل کربنی آغشته به رزین فنولی همان‌طور که از معادلات حاکم مشخص است، یک مسئله چندفیزیکی است که با معادلات دیفرانسیل جزئی بیان می‌شود. دستگاه معادلات دیفرانسیل جزئی بیان‌کننده فیزیک مسئله شامل معادلات غیرخطی و گذرا با ضرایب متغیر و تابع کمیت‌های متغیر با مکان و زمان است. حل دقیق این گونه مسئله چندفیزیکی با استفاده از روش‌های تحلیلی بسیار پیچیده و مشکل است و عملاً مطالعات بسیار اندکی در زمینه ارائه حل تحلیلی معادله کامل فدایش فداشونده‌های زغال‌گذار موجود است. بنابراین، در پژوهش حاضر از روش حل عددی بر پایه اجزای محدود و با به کارگیری نرم‌افزار تجاری Comsol استفاده می‌شود. معادلات حاکم در این نرم‌افزار در رابط‌های نرم‌افزاری معادلات دیفرانسیل جزئی و معمولی جفتی با شرایط مرزی و اولیه تعیین شده قابل حل هستند. روش حل کلی برای این مسئله به صورت زیر شرح داده می‌شود:

تعریف هندسه مسئله

به دلیل کاهش خطاها و زمان انجام محاسبات هندسه یک‌بعدی (خط راست) با طول مشابه با نمونه‌های فداشونده در آزمون اکسی‌استیلن (۵ cm) انتخاب شد. نقطه ابتدایی ($x=0$) به عنوان سطح در تماس

گرمای ذخیره‌شده در فداشونده حین گرمادهی، $\rho c_p \partial T / \partial t$ ؛ انتقال گرمای رسانش در فداشونده، $\nabla \cdot (k \nabla T)$ ؛ گرمای جذب شده به وسیله واکنش تجزیه گرمایی رزین آغشته‌ساز و $(\varepsilon_g \rho_g c_{p,g} v_g) \cdot \nabla T$ ؛ گرمای خالص جابه‌جاشده به وسیله گازهای حاصل از تف‌کافت.

تف‌کافت رزین در ساختار فداشونده‌های کربن-فنولی سبب کاهش چگالی فداشونده حین گرمادهی می‌شود. فرض می‌شود، حین گرمادهی و تف‌کافت رزین نووالاک در بازه زمانی کوتاه، فاز کربنی جز ایروزل کربنی دچار هیچ‌گونه واکنشی نمی‌شود. در حقیقت، سهم واکنش‌های اکسایش تا پیش از تبدیل کامل رزین به زغال در مقابل سهم واکنش‌های تخریب گرمایی رزین ناچیز فرض می‌شود. در این صورت می‌توان تغییرات چگالی فداشونده را با استفاده از معادله آرنیوسی معادله (۲) بیان کرد [۲۵، ۲۸]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \sum_{i=1}^N f_i A_i (\rho_v - \rho_{ch}) \left[\frac{(\rho - \rho_{ch})}{(\rho_v - \rho_{ch})} \right]^{n_i} \exp\left(\frac{-B_i}{T}\right) \quad (2)$$

در این معادله، B_i دمای فعال‌سازی، A_i فاکتور وزنی، f_i بسامد برخورد و n_i درجه واکنش تخریب گرمایی مرحله i ام هستند. N تعداد مراحل واکنش برای دستیابی به بهترین تطبیق بین داده‌های تجربی و تخمینی است. ρ چگالی لحظه‌ای فداشونده، ρ_v و ρ_{ch} به ترتیب چگالی زغال و چگالی ماده دست‌نخورده هستند. پارامترهای این معادله با استفاده از تطبیق با داده‌ها گراموزن‌سنجی تخمین زده می‌شوند.

معادله بقای جرم

معادله بقای جرمی حین گرمادهی که مبین تبدیل فاز جامد به گاز، تجمع یا حرکت گازهای تف‌کافت در ضخامت ایروزل کربنی آغشته به رزین است را می‌توان براساس معادله (۳) به صورت زیر بیان کرد [۲۴]:

$$\frac{\partial (\varepsilon_g \rho_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g v_g) = \Pi \quad (3)$$

در این معادله عبارات اول و دوم طرف چپ تساوی انباشتگی و جابه‌جایی گاز هستند. عبارت Π بیانگر منبع تولید گاز و معادل مقدار کاهش وزن هنگام تبدیل رزین به زغال است.

معادله اندازه حرکت

از آنجا که ایروزل کربنی آغشته به رزین ساختاری متخلخل است.

با شعله و نقطه $x=1=5 \text{ cm}$ به‌عنوان لایه نهایی در تماس با ماده حفاظت‌شده تعیین شدند. فواصل 2 mm به‌عنوان مش‌بندی برای تقسیم فواصل مکانی محاسبات انتخاب شد. در شکل ۱ هندسه تعریف‌شده برای حل مسئله تک‌بعدی فدایش نشان داده شده است.

تعریف پارامترهای ورودی بر نامه از جمله خواص ماده کامپوزیتی، ضرایب ثابت و سایر پارامترهای مدل‌سازی

پارامترهای متغیر در معادلات دیفرانسیل جزئی بقای انرژی، مقدار تف‌کافت رزین و معادله بقای جرم، شامل دما (T)، فشار (P)، چگالی فداشونده (ρ)، چگالی گاز (ρ_g) و سرعت گاز (v_g) هستند. فشار و دما پارامترهای مرتبط بوده و با محاسبه دما و فشار، سایر پارامترها با استفاده از معادلات (۲)، (۴) و (۵) قابل محاسبه هستند. معادلات دیفرانسیل جزئی متناظر با دما و فشار با استفاده از جاگذاری معادله (۴) و معادله حالت گاز کامل در معادلات (۱) و (۳) به‌صورت زیر بازنویسی خواهند شد:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) + (\varepsilon_g \rho_g c_{p,g} v_g) \cdot \nabla T = \frac{\partial \rho}{\partial t} \Delta H_p \quad (6)$$

$$\frac{\varepsilon_g M_g}{R_u T} \frac{\partial P}{\partial t} + \nabla \cdot \left(-\frac{P M_g}{\mu R_u T} \kappa \cdot \nabla P \right) = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (7)$$

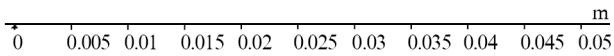
با توجه به معادلات (۶) و (۷) چگالی فداشونده پارامتری تابع دما و زمان است. بنابراین، معادله آرنیوسی به‌طور هم‌زمان با معادلات دیفرانسیل جزئی و با استفاده از ماژول معادلات دیفرانسیل معمولی قابل حل است.

تعریف معادله (۲) با استفاده از ماژول معادلات دیفرانسیل معمولی توزیعی

شکل کلی معادله دیفرانسیل معمولی توزیعی در نرم‌افزار Comsol، ثوابت آن و نیز شرط اولیه لازم برای حل معادله (۲) در ادامه آمده است:

$$e_a \frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial \rho}{\partial t} = f, e_a = 0, d_a = 1 \quad (8)$$

$$f = -\sum_{i=1}^N f_i A_i (\rho_v - \rho_{ch}) \left[\frac{(\rho - \rho_{ch})}{(\rho_v - \rho_{ch})} \right]^{n_i} \exp\left(\frac{-B_i}{T}\right) \quad (9)$$



شکل ۱- هندسه تعریف‌شده برای حل مسئله تک‌بعدی فدایش در COMSOL.

Fig. 1. Defined geometry for solving the 1-dimensional ablation problem in COMSOL.

شرط اولیه $t = 0, \rho = \rho_v$

تعریف معادله دیفرانسیل جزئی معادله (۶) با استفاده از ماژول معادلات دیفرانسیل جزئی به‌شکل ضریبی

شکل کلی معادله دیفرانسیل معمولی توزیعی در نرم‌افزار Comsol، ثوابت و نیز شرایط مرزی و اولیه لازم برای حل معادله در ادامه آمده است:

$$e_a \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-c \nabla T - \alpha T + \gamma) + \beta T + a T = f \quad (10)$$

ثوابت معادله (۱۰)

$$e_a = 0, d_a = \rho c_p, c = k, \alpha = 0, \gamma = 0, \beta = \rho_g \rho_g c_{p,g} v_{g,x}, a = 0$$

$$f = \frac{\partial \rho}{\partial t} \Delta H_p$$

شرط اولیه $t = 0, T = T_0 = 300 \text{ K}$

شرط مرزی اول در سطح فداشونده برای حل معادله (۶) با استفاده از موازنه انرژی روی سطح فداشونده قابل استخراج است. شرط مرزی اول در سطح فداشونده را می‌توان به‌عنوان شرط مرزی Dirichlet (مقدار دمای سطح معین) یا شرط مرزی جابه‌جایی تعریف کرد. هنگام پدیده فدایش، تعادل گرمایی سطح فداشونده به شرایط آیرودینامیکی لایه مرزی گرمایی در سطح فداشونده و فدایش سطحی

در سطح فداشونده) استفاده می‌شود. دمای سطح تعادلی از آزمایش تجربی شعله اکسی استیلن تعیین می‌شود و به‌عنوان ورودی مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۴]. شرط مرزی دوم در پشت فداشونده (۵ cm) از سطح) فرایند بی‌درو (adiabatic) در نظر گرفته می‌شود [۲۴، ۲۷].

تعریف معادله دیفرانسیل جزئی معادله (۷) با استفاده از ماژول معادلات دیفرانسیل جزئی به شکل ضریبی

شکل کلی معادله دیفرانسیل معمولی توزیعی در نرم‌افزار Comsol، ثوابت و نیز شرایط مرزی و اولیه لازم برای حل معادله در ادامه آمده است:

$$e_a \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial P}{\partial t} + \nabla \cdot (-c \nabla P - \alpha P + \gamma) + \beta P + a P = f \quad (13)$$

$$e_a = 0, d_a = \frac{\varepsilon_g M_g}{R_u T}, c = \frac{P M_g}{\mu R_u T} \kappa, \alpha = 0, \gamma = 0, \beta = 0, a = 0, f = \frac{\partial p}{\partial t}$$

$$t = 0, P = P_0 = 101325 \text{ Pa} \quad \text{شرط اولیه}$$

شرایط مرزی برای حل معادله (۱۳) در زیر آورده شده است.

شرط مرزی در سطح فداشونده

$$(0, t) = 0, P = P_0 = 101325 \text{ Pa}$$

شرط مرزی پشت فداشونده-عدم تراوایی از انتهای فداشونده

$$x = 1, (1, t) = \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \quad (14)$$

دلیل اعمال شرط عبورناپذیری در انتهای فداشونده آن است که جریان حرکت گازهای تولید به سمت خارج از فداشونده و از سطح اتفاق می‌افتد [۱۱].

تعریف ماژول هندسه تغییر شکل یافته

به‌منظور واردکردن اثر پسروری سطح بر توزیع دما و چگالی فداشونده از ماژول هندسه تغییر شکل یافته در نرم افزار Comsol بهره گرفته شد. با استفاده از این ماژول و تعریف مقدار پسروری سطح، مش‌بندی هندسی با سرعت مشخص در جهت ارتفاع (ضخامت) فداشونده کاهش می‌یابد و کاهش ضخامت فداشونده حین گرمایش را شبیه‌سازی می‌کند. بنابراین، در این بخش با استفاده از سرعت پسروری خطی به‌دست‌آمده از نتایج تجربی می‌توان مقدار پسروری سطحی نمونه را در شبیه‌سازی وارد کرد.

فداشونده وابسته است. در این صورت می‌توان موازنه انرژی در سطح را به‌صورت معادله (۱۱) تعریف کرد:

$$-k \frac{dT}{dx} = \dot{q}_{cw} \left(1 - \frac{h_w}{h_r}\right) \phi_b - \varepsilon \sigma (T_w^4 - T_{ref}^4) - \rho_{ch} \dot{s} (h_w - h_u) \quad (11)$$

در این معادله، عبارت $-k \frac{dT}{dx}$ بیانگر گرمای خالص رسانش ورودی به فداشونده و \dot{q}_{cw} ؛ شار گرمایی اعمال‌شده به‌وسیله شعله اکسی استیلن است. اما، به‌دلیل پدیده مسدودسازی گازی ناشی از خروج گازهای تف‌کافت از سطح همه گرمای این شعله به سطح منتقل نمی‌شود و تنها کسری از آن معادل با $\dot{q}_{cw} \left(1 - \frac{h_w}{h_r}\right) \phi_b$ به سطح انتقال می‌یابد. در حقیقت، اثر لایه مرزی داغ روی سطح عایق کاهش می‌یابد. در این عبارت، ϕ_b ، فاکتور تصحیح دمش؛ h_w ، آنتالپی گاز در لایه مرزی سطحی و h_r ، آنتالپی جریان گاز است. برای تخمین ϕ_b می‌توان از رابطه تجربی ساده‌ای بر مبنای نفوذ هوا در هوا مطابق معادله (۱۱) بهره جست:

$$\phi_b = \chi \left(\frac{M_a}{M_g}\right)^z \quad (12)$$

در آزمون شعله اکسی استیلن χ ، M_a ، M_g و Z ، به‌ترتیب ضریب تصحیح بین ۰/۶۸ تا ۰/۷۲، وزن مولکولی هوا (۰/۲۸ kg/mol)، وزن مولکولی مخلوط گاز تف‌کافت (۰/۱۲ kg/mol) و ضریب توانی (۰/۲۶) هستند [۲۷]. بخشی از گرمای وارده به سطح از سازوکار تابش به لایه مرزی برمی‌گردد که با عبارت $(T_w^4 - T_{ref}^4)$ بیان می‌شود. در این عبارت ε ، ضریب بازتابش، σ ثابت استفان-بولتزمن، و T_w و T_{ref} به‌ترتیب دمای سطح فداشونده و دمای محیط هستند. بخشی از گرمای وارده به سطح نیز سبب سوختن زغال و پسروری سطح می‌شود. این مقدار گرما به‌وسیله عبارت $\varepsilon \sigma (T_w^4 - T_{ref}^4)$ بیان می‌شود. در این عبارت، \dot{s} ، مقدار پسروری سطحی و h_u ، آنتالپی زغال سطحی است. استفاده از این معادله برای تعیین دمای تعادلی سطح مستلزم اندازه‌گیری دقیق یا دسترس‌پذیری داده‌های مربوط به لایه مرزی سطح (جدول گرمایشی) در حال گرمادهی است. از طرفی تعادل دمایی ایجادشده در سطح به‌صورت دمای سطحی تعادلی در آزمایش اکسی استیلن قابل اندازه‌گیری است. در حقیقت دمای سطح فداشونده با شروع اعمال شار گرمایی با مقدار بسیار زیاد در لحظات اولیه و زمان بسیار کوتاه به دمای تعادلی و ثابت می‌رسد. در این پژوهش به‌منظور ساده‌سازی از شرط مرزی Dirichlet (دمای ثابت

رسانش گرمایی زغال برجای مانده هستند.

ظرفیت گرمایی ویژه

ظرفیت گرمایی ویژه کامپوزیت‌های زغال‌گذار در دمای زیاد را نیز می‌توان با استفاده از قانون مخلوط‌ها تخمین زد. کامپوزیت زغال‌گذار در هر لحظه از فرایند فدایش (در هر دما) از دو فاز تخریب‌شده (زغال) و تخریب‌نشده (دست‌نخورده) تشکیل شده است و در نتیجه می‌توان ظرفیت گرمایی ویژه کامپوزیت را در هر مرحله از تخریب گرمایی با استفاده از معادله (۱۷) تعیین کرد [۳۰]:

$$C_p = C_{p, ch} \omega + (1 - \omega) C_{p, v} \quad (17)$$

در این معادله C_p ، $C_{p, v}$ و $C_{p, ch}$ به ترتیب ظرفیت گرمایی ویژه لحظه‌ای برای ایروزل کربنی آغشته به رزین در حال فدایش، کامپوزیت دست‌نخورده و زغال برجای مانده هستند. شایان ذکر است، ظرفیت گرمایی ویژه خود تابعی از دماست و با افزایش دما با شیب بسیار کندی افزایش می‌یابد و با آزمون گرماسنجی قابل اندازه‌گیری است.

تراوایی فداشونده‌ها

تراوایی نمونه‌های تهیه‌شده در هر مرحله از فرایند تف‌کافت تغییر می‌کنند. حد بالای تراوایی نمونه‌ها مربوط به حالت زغال و حد پایین این مشخصه در حالت دست‌نخورده خواهد بود. در نتیجه در هر لحظه از بازه زمانی گرمادهی تراوایی کامپوزیت به درجه تخریب گرمایی وابسته است. با در نظر گرفتن رابطه خطی و قانون مخلوط‌ها می‌توان معادله (۱۸) را برای محاسبه تراوایی نمونه‌ها حین فرایند فدایش به کار برد [۱۱]:

$$\kappa = \kappa_{ch} \omega + (1 - \omega) \kappa_v \quad (18)$$

در این معادله، κ ، تراوایی نمونه؛ κ_v ، تراوایی کامپوزیت در حالت دست‌نخورده و κ_{ch} ، تراوایی نمونه در حالت زغال هستند.

تجربی

مواد

در این پژوهش، از رزین فنولی از نوع نووالاک (IP502) ساخت شرکت رزیتان) به‌عنوان پیش‌ماده آلی تهیه ایروزل‌های کربنی و نیز

خواص گرمایی-فیزیکی عایق‌های فداشونده و مدل‌سازی آن‌ها

فرایند فدایش کامپوزیت‌های پلیمری زغال‌گذار، با تغییر در خواص گرمایی-فیزیکی سامانه همراه است. داشتن اطلاعات و داده‌های دقیق از نحوه تغییرات این خواص با دما و در نواحی مختلف فداشونده، برای تحلیل فرایند فدایش ضروری است، زیرا پاسخ گرمایی سامانه‌های فداشونده به مقادیر این خواص وابستگی زیادی دارند. خواصی مانند رسانندگی گرمایی، تراوایی و ظرفیت گرمایی ویژه مربوط به کامپوزیت در حالت‌های مختلف از شروع گرمادهی تا پایان فرایند متغیر هستند و باید در معادلات حاکم وارد شوند. بنابراین، در این بخش مدل‌سازی این پارامترها بررسی می‌شود. روابط این بخش برای تخمین این ثوابت، در معادلات حاکم وارد می‌شوند و در نتیجه تغییرات این پارامترها در مدل‌سازی لحاظ می‌شوند.

درجه تخریب گرمایی (درصد تبدیل)

تغییرات چگالی کامپوزیت‌های زغال‌گذار به دلیل تجزیه رزین پلیمری و در نتیجه تبدیل به دو جزء گازی و جامد حین فرایند فدایش به دمای لایه‌های مختلف کامپوزیت وابسته است و مقداری بین حد بالایی یعنی چگالی ماده دست‌نخورده و حد پایینی یعنی چگالی زغال به جای مانده خواهد بود. در نتیجه می‌توان درجه تخریب گرمایی را بر مبنای تابع چگالی به‌صورت معادله (۱۵) تعریف کرد [۲۴، ۲۵، ۳۰]:

$$\omega(T) = \frac{\rho_v - \rho(T)}{\rho_v - \rho_{ch}} \quad (15)$$

در این معادله ρ_v ، ρ_{ch} ، $\rho(T)$ و $\omega(T)$ ، به ترتیب چگالی فداشونده در دمای معین، چگالی فاز زغال، چگالی کامپوزیت دست‌نخورده و درجه تخریب گرمایی هستند.

تغییرات ضریب رسانش گرمایی مؤثر و ظرفیت گرمایی ویژه

با فرض ثابت بودن و اندازه‌گیری رسانش گرمایی ماده دست‌نخورده و زغال در دمای محیط، با داشتن درجه تخریب گرمایی، مقدار ضریب رسانش گرمایی کامپوزیت هنگام فدایش از معادله (۱۶) قابل تخمین است [۳۰]:

$$k = k_{ch} \omega + (1 - \omega) k_v \quad (16)$$

در این معادله، k ، k_v و k_{ch} به ترتیب رسانش گرمایی مؤثر لحظه‌ای ایروزل کربنی آغشته به رزین، رسانش گرمایی کامپوزیت دست‌نخورده و

رزین آغشته‌ساز در حفره‌ها در دمای 160°C به مدت ۴ h انجام شد. نمونه‌های متخلخل کامپوزیتی با $Cx-y$ نام‌گذاری شدند که x و y به ترتیب بیانگر چگالی ایزوژل کربنی و y چگالی نهایی کامپوزیت بر حسب g/cm^3 پس از آغشته‌سازی هستند.

آزمون‌ها

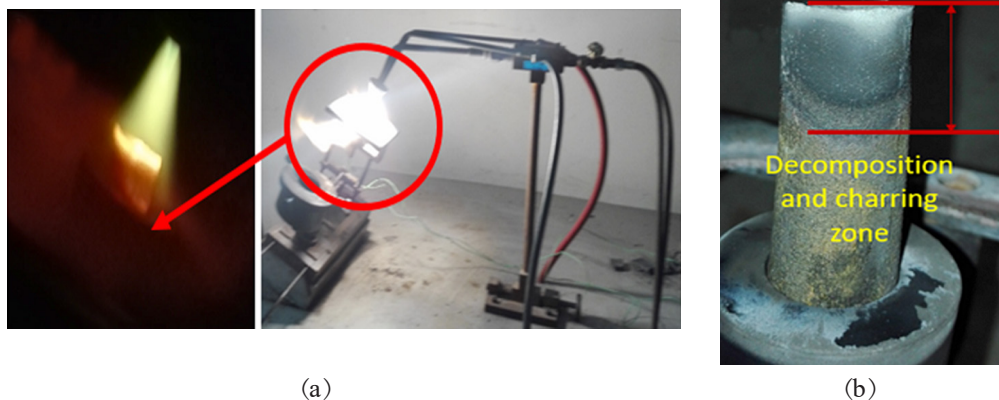
آزمون‌های گرماوزن‌سنجی و گرماسنجی پوششی تفاضلی با گرماسنج مدل Q100 ساخته شرکت TA آمریکا انجام شدند. به منظور تعیین رسانندگی گرمایی مؤثر نمونه‌های تهیه‌شده در دمای محیط از روش صفحه داغ-سرد استفاده شد. در این آزمون قرص نمونه بین دو صفحه سرد و گرم قرار داده می‌شود و با تعیین شار گرمایی انتقالی از نمونه و اختلاف دمای دو طرف قرص نمونه، می‌توان رسانندگی گرمایی مؤثر در دمای محیط را تخمین زد. به منظور شبیه‌سازی پدیده فدایش و بررسی کارایی فداشوندگی نمونه‌های تهیه‌شده از آزمون شعله اکسی استیلن بر مبنای استاندارد ASTM E 285-80 استفاده شد. بدین منظور از تجهیزات آزمون اکسی استیلن مستقر در دانشگاه تربیت مدرس استفاده شد. شار گرمایی ثابت به مقدار $2/5 \text{ MW/m}^2$ با تنظیم جریان حجمی گازهای اکسیژن و استیلن انتخاب شد و دمای سطح نمونه‌ها با تفسنج (pyrometer) دو طیفی Digital bi-colour (آلمان) اندازه‌گیری شد. نمونه‌های آزمون به شکل استوانه با قطر ۲ cm و ارتفاع ۵ cm تهیه شدند و با یک نگه‌دارنده استوانه‌ای از جنس گرافیت در معرض شعله قرار داده شدند. به منظور اندازه‌گیری دما در عمق نمونه‌های استوانه‌ای، سوراخی با قطر ۱ mm و عمق $2/5$ و $3/5$ cm در مرکز نمونه‌ها ایجاد شد و گرماجفت (thermocouple)

رزین آغشته‌ساز استفاده شد. این رزین دارای ۸-۹٪ وزنی هگزامتیلن تترامین به عنوان عامل پخت است. از حلال ایزوپروپانول (ساخت شرکت دکتر مجللی-ایران) به عنوان حلال رزین نووالاک در مرحله سل-ژل اشباع از بخار حلال استفاده شد. از استون (ساخت شرکت Merck آلمان) به عنوان حلال رزین نووالاک در مرحله آغشته‌سازی رزین به درون حفره‌های ایزوژل‌های کربنی در فرایند آغشته‌سازی با خلأ استفاده شد.

دستگاه‌ها و روش‌ها

ساخت نمونه‌ها

ایزوژل‌های نووالاک با روش سل-ژل اشباع از بخار حلال و خشک‌کردن محیطی تهیه شدند [۳۱]. غلظت نووالاک در حلال ۲-پروپانول در مرحله سل-ژل ۱۰٪ وزنی انتخاب شد. پس از انجام فرایند سل-ژل در محیط اشباع از بخار حلال، ژل‌های یکپارچه خشک شدند. ایزوژل‌های نووالاکی حاصل با فرایند گرماکافت در دمای 900°C ، طبق برنامه گرمایی معین [۲۸] و تحت جو گاز نیتروژن به ایزوژل‌های کربنی یکپارچه تبدیل شدند. به منظور انجام فرایند آغشته‌سازی به وسیله خلأ از محلول ۱۰٪ وزنی نووالاک در استون استفاده شد. محلول تهیه‌شده به وسیله خلأ در چرخه‌های آغشته‌سازی-خشک‌کردن متعدد به درون ساختار متخلخل ایزوژل کربنی آغشته‌سازی شد. هر مرحله آغشته‌سازی به مدت ۳۰ min انجام شد و پس از آن حذف حلال در دمای 40°C و درون آن خلأ انجام شد. در هر مرحله آغشته‌سازی-خشک‌کردن سنجش چگالی کامپوزیت انجام شد. پس از دستیابی به چگالی مدنظر کامپوزیت، فرایند پخت



شکل ۲- (a) تصویر کامپوزیت CA0.142-0.36 حین آزمون فدایش تحت شعله اکسی استیلن و (b) ناحیه تخریب گرمایی و زغال پس از آزمون. Fig. 2. (a) Image of the CA0.142-0.36 composite during the ablation test under oxyacetylene flame and (b) decomposition and charring zones after the test.

از این معادله برای تعیین تراوایی گازی محیط متخلخل، آرام و گران‌رو بودن جریان است. به‌منظور تعیین الگوی جریان در ساختار متخلخل حفره‌ها می‌توان از عدد بدون بعد نادسن بهره جست. عدد بدون بعد نادسن به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Kn = \lambda / d \quad (20)$$

در این معادله λ مسیر پویش آزاد گاز و d قطر میانگین حفره‌های نمونه متخلخل است. مسیر پویش آزاد نیتروژن در دمای اتاق ۶۶ nm، هوا برابر ۶۸ nm است. بنابراین، با توجه به قطر متوسط حفره‌ها سه نوع الگوی جریان گران‌رو ($Kn \ll 1$)، نفوذ مولکولی ($Kn \gg 1$) و ترکیبی نفوذ مولکولی و جریان گران‌رو ($Kn = 1$) پدید خواهد آمد. از آنجا که اندازه حفره‌های ایروزل‌های کربنی، نمونه‌های فداشونده در حالت دست‌نخورده و زغال دارای حفره‌ها در مقیاس میکرومتر هستند. بنابراین، عدد نادسن در محدوده ۰/۰۱ خواهد بود و می‌توان فرض کرد، الگوی جریان گران‌رو است.

نتایج و بحث

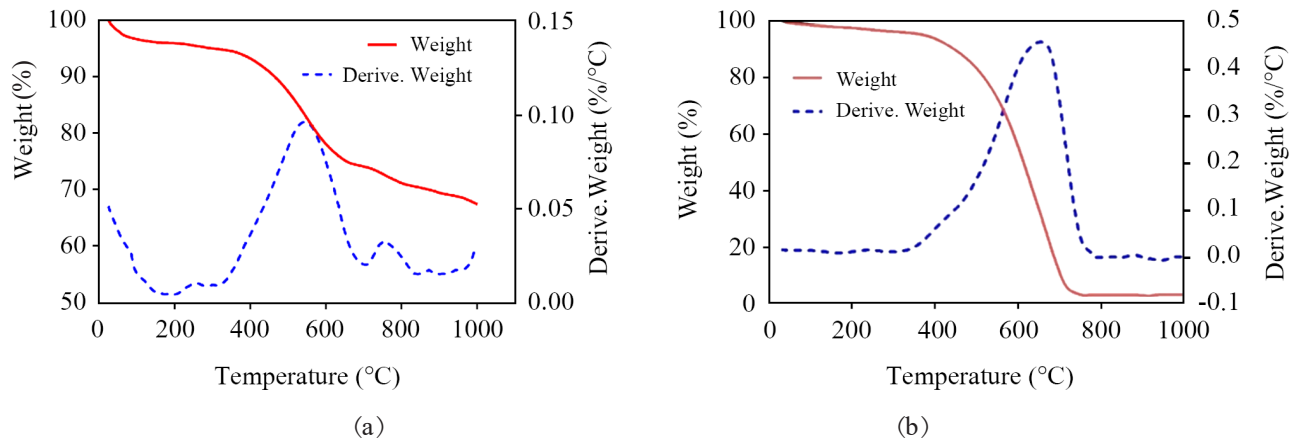
در شکل ۳ (a) و (b) به‌ترتیب نمودارهای مربوط به آزمون TGA و DTG برای نمونه CA0.142-0.36 تحت جو گاز آرگون و هوا آورده شده است. از آنجا که فداشونده‌های متخلخل آغشته به رزین از دو فاز کربنی و فنولی تهیه شده‌اند، رفتار گرمایی فداشونده تحت جو آرگون تغییرات جرمی و نیز محدوده دمایی این تغییرات را برای رزین آغشته‌ساز نشان خواهد داد. زیرا، در این شرایط واکنش‌های اکسایش فازهای کربنی یعنی ایروزل کربنی و نیز زغال حاصل از تف‌کافت رزین اتفاق نمی‌افتد. با توجه به شکل ۳ (a)، تخریب گرمایی فداشونده در سه ناحیه دمایی اتفاق می‌افتد. در محدوده دمایی کمتر از ۲۵۰ °C کاهش وزن ۵٪ نمونه را می‌توان به حذف آب و رطوبت جذب‌شده در ساختار متخلخل فداشونده و تخریب گرمایی مونومرهای رزین شبکه‌ای نشده نسبت داد. کاهش وزن شدید در ناحیه پهن دمایی از ۴۰۰ °C تا ۶۳۰ °C (۲۰٪) به‌دلیل کربنی شدن رزین آغشته‌ساز و آزادسازی گازهای حاصل از این فرایند است. دمای حداکثر سرعت تخریب گرمایی در این مرحله ۵۳۰ °C (دمای قله تخریب گرمایی) است.

ناحیه سوم در محدوده دمایی ۷۰۰ °C تا ۹۰۰ °C را می‌توان به تغییرات بلورینگی فاز کربن حاصل از کربنی شدن رزین نسبت داد.

نیکل-کروم نوع K در سوراخ تثبیت شد. در شکل ۲ (a) و (b) نحوه اعمال شعله و سطح نمونه در معرض شار گرمایی حین آزمون نشان داده شده است. در این پژوهش، مطالعه رفتار گرمایی رزین نانوکامپوزیتی نووالاک-نانورس با آزمون گرماسنجی پویشی تفاضلی انجام شد. بدین منظور دما با سرعت ۱۰ °C/min از دمای محیط تا دمای ۳۰۰ °C در جو نیتروژن افزایش یافت. همچنین، برای تعیین ظرفیت گرمایی زغال و فاز دست‌نخورده نمونه‌های فداشونده از آزمون DSC با گرماسنجی پویشی تفاضلی مدل Diamond DSC-SDT Q600، شرکت سازنده Elmer Perkin استفاده شده است. همچنین به‌منظور تعیین ظرفیت گرمایی ویژه نمونه‌های کامپوزیتی پیش از دمای شروع تخریب گرمایی رزین از آزمون DSC با دستگاه نام‌برده با سرعت گرمایی ۱۰ °C/min از دمای محیط تا دمای ۳۰۰ °C در جو خنثی (آرگون) مطابق با استاندارد ASTM E-1269 استفاده شد. همچنین مقادیر آنتالپی (گرمای) تخریب گرمایی نمونه‌ها از محاسبه سطح زیر پیک گرمای تخریب به‌دست آمده است. به‌منظور تخمین تراوایی (تراوایی مطلق) نمونه‌های فداشونده در حالت دست‌نخورده و فاز زغال از دستگاه اندازه‌گیری تراوایی به‌وسیله گازها مدل GP-R 20 (ساخته‌شده به‌وسیله شرکت فناوری ازدیاد برداشت فارس) استفاده شد. با این دستگاه می‌توان تراوایی محیط‌های متخلخل را با استفاده از گازی مشخص (نیتروژن) اندازه‌گیری کرد. اساس کار دستگاه بر معادله دارسی استوار است که می‌توان آن را برای تخمین تراوایی به‌صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\kappa = \frac{Q_b \mu P_b}{A \Delta P P_m} \quad (19)$$

در این معادله، A ، سطح مقطع نمونه استوانه‌ای؛ l ، طول نمونه؛ μ ، گران‌روی گاز ۰/۰۰۰۰۱۸ Pa·s) گاز نیتروژن در شرایط استاندارد)، P_m ، فشار میانگین ($P_m = \frac{P_{in} - P_{out}}{2}$)؛ Q_b ، جریان حجمی گاز؛ ΔP ، اختلاف فشار دو سر نمونه و P_b ، فشار محیطی هستند. نمونه‌های فداشونده دست‌نخورده و زغال آن‌ها برای این آزمون با قطر ۲ cm و ارتفاع ۴ cm تهیه شدند. برای تهیه نمونه‌های زغال، نمونه‌های فداشونده در دمای ۱۰۰۰ °C در جو گاز خنثی (نیتروژن) به‌مدت ۱ h در کوره تحت عملیات گرمایی قرار گرفتند. نمونه‌های تهیه‌شده درون سلول دستگاه قرار داده شده می‌شود. با تنظیم سرعت حجمی گاز، گاز درون نمونه‌ها جریان می‌یابد و پس از پایدار شدن فشارهای ورودی و خروجی و مقدار محاسبات برای تعیین تراوایی نمونه براساس معادله دارسی انجام می‌شود. نکته قابل توجه این است که شرط استفاده



شکل ۳- نتایج گرماوزن‌سنجی و گرماوزن‌سنجی دینامیکی نمونه CA0.142-0.36: (a) تحت جو آرگون و (b) تحت جو هوا.

Fig. 3. TGA and DTG results of sample CA0.142-0.36 (a) under argon atmosphere and (b) under air atmosphere.

کامپوزیتی تهیه‌شده با استفاده از بازده زغال رزین نووالاک و نیز چگالی فداشونده‌ها با استفاده از معادله (۲۱) قابل محاسبه است [۲۰]:

$$\omega_g = (1 - \alpha)(\rho_v - \rho_0) \quad (21)$$

در این معادله α ، ρ_v و ρ_0 به ترتیب بازده زغال رزین نووالاک، چگالی فداشونده متخلخل کامپوزیتی و چگالی ایزوژل کربنی هستند. بازده زغال رزین نووالاک با استفاده از آزمون گرماوزن‌سنجی در محیط نیتروژن معادل با ۰/۵۶ تخمین زده شد. پارامترهای ذکرشده برای فداشونده‌های متخلخل کامپوزیتی در جدول ۱ آورده شده‌اند.

کربنی شدن نووالاک پخت‌شده با هگزامتیلن تترامین، در دماهای بیشتر خروج گازهای تف‌کافت ۳۳٪ است. تخریب گرمایی فداشونده تحت جو هوا، با واکنش‌های تخریب گرمایی-اکسایشی رزین نووالاک، اکسایش زغال به جای مانده و فاز ایزوژل کربنی به صورت هم‌زمان همراه است. دمای حداکثر تخریب گرمایی-اکسایشی فداشونده متخلخل CA0.142-0.36، ۶۵۴ °C تعیین شد.

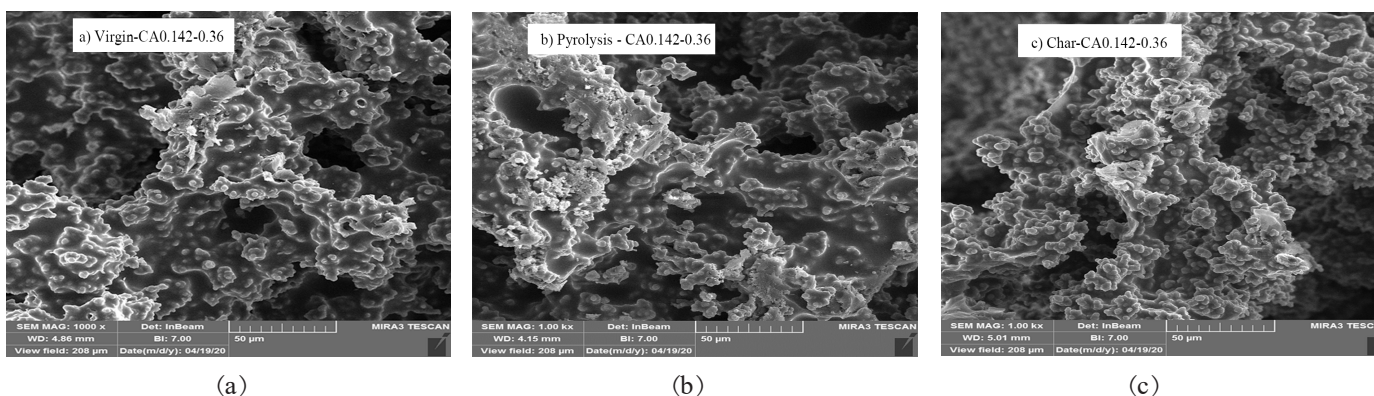
کارایی فداشوندگی

دمای سطحی و مقدار فدایش فداشونده‌های متخلخل کامپوزیتی مقدار گاز حاصل از تف‌کافت رزین بر واحد حجم (ω_g) فداشونده‌های

جدول ۱- داده‌های ورودی مدل (خواص فیزیکی و گرمایی) نمونه‌های مورد ارزیابی شده.

Table 1. Model input data (physical and thermal properties) of the evaluated samples.

Properties/Sample	Parameter	SI unit	CA0.142-0.36	CA0.142-0.76
Density (virgin)	ρ_v	kg/m ³	363	756
Density (char)	ρ_{ch}	kg/m ³	246	330
Thermal conductivity (virgin)	k_v	W/m.K	0.14	0.33
Thermal conductivity (char)	k_{ch}	W/m.K	0.12	0.25
Permeability (virgin)	κ_v	m ²	3.9×10^{-11}	4.6×10^{-15}
Permeability (char)	κ_{ch}	m ²	2.6×10^{-9}	7.7×10^{-12}
Thermal capacity (virgin)	c_{pv}	J/kg.K	1260	1407
Thermal capacity (char)	c_{pch}	J/kg.K	820	970
Recession rate	\dot{s}	m/s	0.091×10^{-3}	0.055×10^{-3}
Surface temperature	T_w	K	1723	1709
Heat of polymer degradation	ΔT_p	J/kg	1.82×10^6	1.82×10^6



شکل ۴ - تصاویر SEM از نمونه‌های CA0.142-0.36 (مقیاس ۵۰ μm) از نواحی: (a) دست‌نخورده، (b) تف‌کافت و (c) زغال پس از آزمون فدایش تحت شعله اکسی‌استیلن.

Fig. 4. SEM images of CA0.142-0.36 (scale: 50 μm) of (a) virgin, (b) pyrolysis, and (c) char zones after ablation test under oxyacetylene flame.

به‌واسطه پسروری سطح بسیار ناچیز باشد، می‌توان فدایش را حجمی دانست. از طرفی در فدایش سطحی چگالی کامپوزیت ثابت می‌ماند و کاهش جرم به‌واسطه پسروری سطح (کاهش حجم) اتفاق می‌افتد. به همین دلیل پدیده فدایش کامپوزیت متخلخل بر پایه ایروزل کربنی را می‌توان پدیده‌ای حجمی دانست. در جدول ۱ داده‌های ورودی مدل (خواص فیزیکی و گرمایی) نمونه‌های مورد ارزیابی به‌طور کامل آورده شده است.

تحوالات ساختاری و سازوکار فداشوندگی

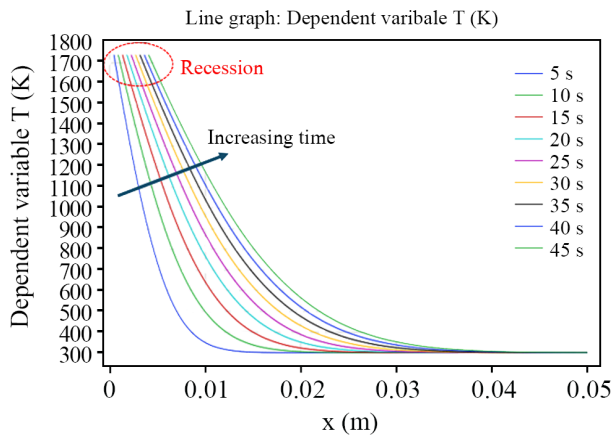
در شکل ۴ ریزساختار و شکل‌شناسی نمونه CA0.142-0.36 تهیه‌شده در عمق‌های مختلف نمونه پس از آزمون فدایش با شعله اکسی‌استیلن آورده شده است. تصاویر نواحی زغال، تف‌کافت و ماده دست‌نخورده به‌ترتیب مربوط به سطح نمونه‌های باقی‌مانده در معرض شعله، عمق ۲/۵ cm و عمق ۳/۵ cm از سطح در معرض شعله هستند که با استفاده از خواص ظاهری نمونه‌ها پس از فرایند سوختن قابل تشخیص است. در سطح در معرض شار گرمایی، برای نمونه CA0.189-0.36 کلویدهای کربنی و مقدار کمی زغال حاصل از تف‌کافت رزین (در مقایسه با ناحیه تف‌کافت و دست‌نخورده) به‌صورت شبکه سه‌بعدی متخلخل مشاهده می‌شود. همچنین مقدار زغال به‌جای‌مانده در سطح برای نمونه CA0.142-0.36 زیاد و تخلخل سطحی کم است. نکته قابل توجه دیگر اینکه کلویدهای کربنی در سطح ریز و دارای شکل‌شناسی تیزی هستند. با توجه به رفتار نمونه‌ها و سازوکار فدایش کامپوزیت‌های متخلخل بر پایه الیاف کربن، می‌توان سازوکاری پیشنهادی برای فدایش کامپوزیت‌های متخلخل بر پایه ایروزل کربنی ارائه داد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار گازهای تف‌کافت تولیدشده در نمونه CA0.142-0.76، به‌دلیل بارگذاری بیشتر رزین، مقدار بیشتری است. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های سامانه‌های فداشونده متخلخل قابلیت تولید و انتقال گازهای ناشی از پیرولیز به سطح فداشونده است. گازهای منتقل‌شده به‌کمک شبکه متخلخل ایروزل کربنی به سطح فداشونده باعث ایجاد لایه محافظ گازی در برابر انتقال گرمای شعله به سطح فداشونده شده و سبب خنک‌سازی سطح فداشونده به‌کمک پدیده مسدودسازی گازی می‌شوند [۲۰]. به‌همین دلیل فداشونده CA0.142-0.36 دمای سطحی بیشتری را تجربه می‌کند. مشخصه‌های فداشوندگی از جمله مقدار فدایش خطی (LAR) و فدایش جرمی (MAR) به‌وسیله اندازه‌گیری وزن و ضخامت نمونه‌ها پیش و پس از آزمون شعله به‌ترتیب با معادله‌های (۲۲) و (۲۳) محاسبه شدند:

$$LAR = dl/dt \quad (22)$$

$$MAR = dm/dt \quad (23)$$

در این معادله‌ها dl و dm به‌ترتیب تغییرات ضخامت و جرم نمونه در مدت زمان dt (زمان اعمال شعله) هستند. زمان اعمال شعله برای نمونه‌ها ۴۵ s در نظر گرفته شد. با توجه به جدول ۱، هر دو نمونه مقدار فدایش جرمی و خطی بسیار کمی را در مقایسه با فداشونده‌های مرسوم نشان می‌دهند. در پدیده فدایش، جرم سامانه کامپوزیتی کاهش می‌یابد. در صورتی که حجم کامپوزیت تغییر نکند یا کاهش حجم



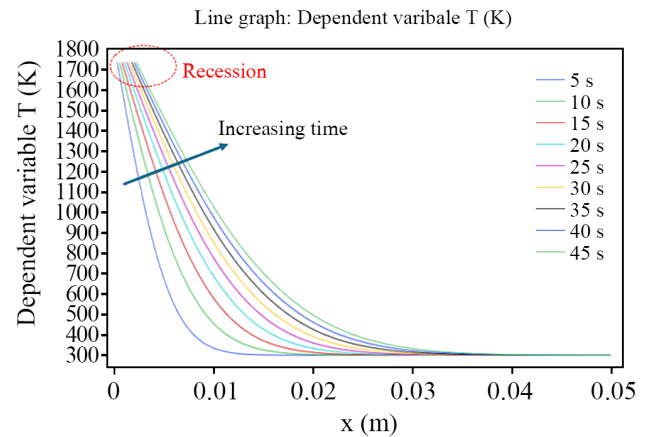
شکل ۶- توزیع دمای ناپایدار در عمق نمونه فداشونده CA0.142-0.36. Fig. 6. Unsteady temperature distribution at the depth of the CA0.142-0.36 ablator.

گرمایی از نمونه خارج می‌شوند. تف‌کافت نووالاک هم‌زمان با خروج گازهای حاصل از شکستن پیوندهای شیمیایی رزین، اتفاق می‌افتد و به ضخامت ناحیه زغال می‌افزاید. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با توجه به این مشاهدات می‌توان گفت، با افزایش نسبت رزین به فاز کربنی، سهم سازوکار فدایش سطحی نسبت به سازوکار حجمی افزایش می‌یابد.

تحلیل نتایج مدل‌سازی و تجربی

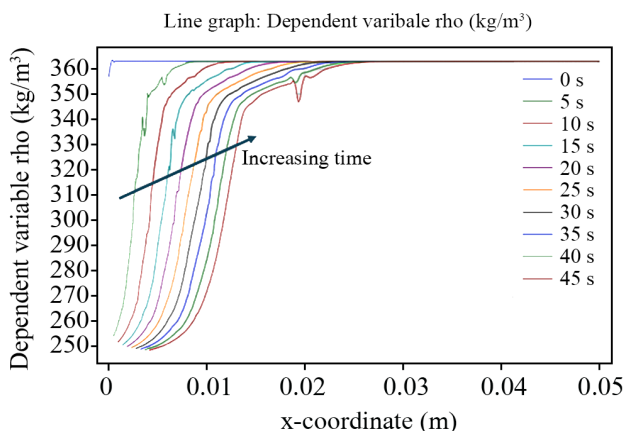
دمای عمقی حین فدایش

با آغاز تجربه شار گرمایی به‌کمک فداشونده به‌مدت ۴۵ s، دمای عمقی هر دو نمونه شروع به افزایش کرده و پس از خارج شدن از

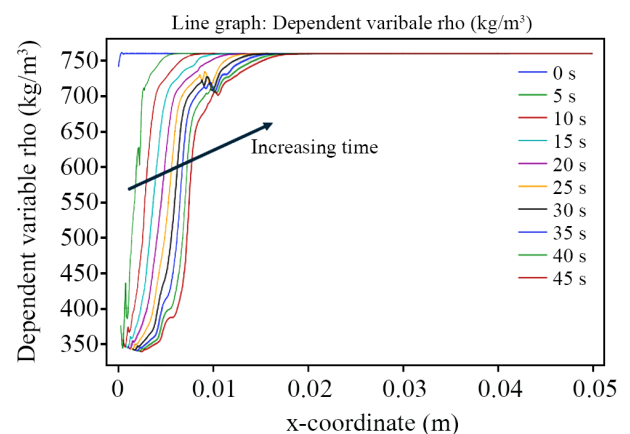


شکل ۵- توزیع دمای ناپایدار در عمق نمونه فداشونده CA0.142-0.76. Fig. 5. Unsteady temperature distribution at the depth of the CA0.142-0.76 ablator.

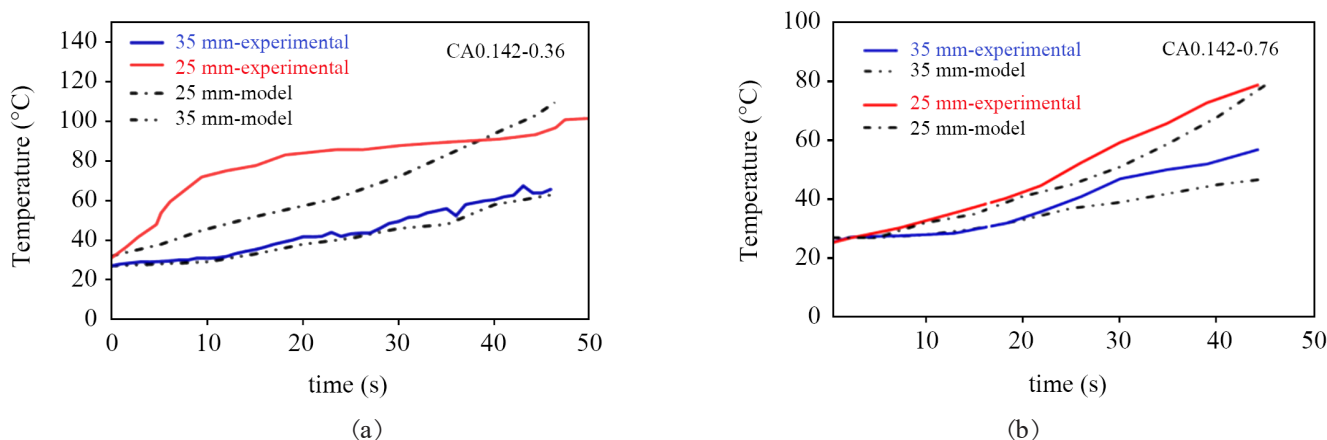
با شروع اعمال شار گرمایی بر سطح نمونه‌ها، با انتقال گرما به سطح، دمای سطح افزایش یافته و انتقال گرما درون کامپوزیت سبب ایجاد نیم‌رخ دمایی در ضخامت فداشونده می‌شود. در ناحیه سطحی با رسیدن دما به دمای شروع تجزیه گرمایی رزین، رزین آغشته‌ساز روی سطح کلئیدهای کربنی و درون حفره‌ها شروع به تخریب گرمایی می‌کند و به گاز و زغال متخلخل تبدیل می‌شود. فاز زغال بر جای مانده به‌صورت پوشش روی کلئیدهای کربنی و نیز درون حفره‌های ایروزل ایجاد می‌شود و انتقال گرما به ناحیه تف‌کافت را کند می‌کند. با ادامه گرمادهی، لایه سطحی کربنی متشکل از پوشش زغالی و کلئیدهای کربنی شروع به اکسایش سطحی و فدایش می‌کند. در ناحیه تف‌کافت، گازهای حاصل از تف‌کافت در خلاف جهت شار



شکل ۸- توزیع چگالی گذرا در عمق نمونه فداشونده CA0.142-0.36. Fig. 8. Transient density distribution at the depth of the CA0.142-0.36 ablator.



شکل ۷- توزیع چگالی گذرا در عمق نمونه فداشونده CA0.142-0.76. Fig. 7. Transient density distribution at the depth of the CA0.142-0.76 ablator.



شکل ۹- دمای عمقی تجربی و مدل برای فداشونده‌های منتخب در ضخامت ۲۵ و ۳۵ mm از سطح در معرض شعله.

Fig. 9. Experimental and model depth temperatures for selected sacrificial materials at 25 mm and 35 mm thickness from the flame-exposed surface.

که برای فداشونده سنگین‌تر تف‌کافت و فدایش در ناحیه سطحی اتفاق می‌افتد.

در شکل ۹ برای نمونه‌های تهیه‌شده، نمودارهای تغییرات دمای عمقی در دو ضخامت ۲۵ و ۳۵ mm از سطح در معرض شله تا زمان ۴۵ s حاصل از آزمون شعله اکسی‌استیلن و مدل‌سازی آورده شده است. از مقایسه نتایج مدل و تجربی برای هر دو نمونه می‌توان دریافت، با وجود تخمین نسبتاً مطلوب تغییرات دمای نظری به‌کمک مدل برای هر دو ضخامت نمونه‌های تهیه‌شده، دماهای پیش‌بینی‌شده به‌وسیله مدل، مقادیر کمتری از نتایج تجربی را نشان می‌دهند. این اختلاف ممکن است، به دلیل عدم واردکردن تابعیت دمایی پارامترهای موادی نظیر ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب رسانندگی گرمایی فاز زغال و ماده دست‌نخورده نمونه‌ها در مدل نظری باشد. به‌عنوان مثال ضریب رسانندگی گرمایی زغال و ماده دست‌نخورده هر دو توابع صعودی از دما هستند. با توجه به نتایج، مدل نظری استفاده‌شده در این مطالعه و نیز روش شبیه‌سازی به‌وسیله نرم‌افزار Comsol Multiphysics امکان تخمین نظری دمای عمقی و نیز ناحیه تخریب گرمایی را برای فداشونده‌های بر پایه ایروزل کربنی فراهم می‌کند.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، ایروزل‌های کربنی به‌عنوان پیش‌ساخته کربنی در فداشونده متخلخل کربنی آغشته به رزین فنولی استفاده شدند. تخلخل موجود در ساختار این فداشونده‌ها باعث ایجاد قابلیت کنترل چگالی

معرض شعله دماهای ثبت‌شده تا محدوده زمانی ۲۰۰ s افزایشی است. اما دمای عمقی برای نمونه CA0.142-0.36 همواره بیشتر از دما در عمق متناظر برای نمونه CA0.142-0.76 است. در شکل‌های ۵ و ۶ توزیع دما به‌صورت تابعی از عمق و زمان اعمال شار گرمایی به‌ترتیب برای نمونه‌های CA0.142-0.36 و CA0.142-0.76 آورده شده است. مقایسه نمودار دمایی نمونه‌های CA0.142-0.36 و CA0.142-0.76 نشان می‌دهد، کاهش چگالی فداشونده (کاهش رزین آغشته‌ساز) سبب افزایش دمای عمقی نمونه در زمان گرمادهی یکسان می‌شود. با استفاده از نتایج مدل نظری امکان تخمین ضخامت مناسب فداشونده محیا می‌شود.

برای نمونه‌های CA0.142-0.36 و CA0.142-0.76 در ضخامت‌های بیش از ۳/۵ و ۳/۸ cm، دمای فداشونده به دمای محیط رسیده و شرایط ایده‌آل برای جلوگیری از انتقال گرما به تجهیز محافظت‌شده ایجاد می‌شود. در شکل‌های ۷ و ۸ توزیع چگالی گذرا به‌صورت تابعی از عمق و زمان اعمال شار گرمایی به‌ترتیب برای نمونه‌های CA0.142-0.36 و CA0.142-0.76 آورده شده است. با توجه به اینکه در مرحله اصلی تف‌کافت (واکنش‌های تخریب رزین) کاهش چگالی شدید رخ می‌دهد، در نتیجه از منحنی‌های نام‌برده قابلیت تعیین ناحیه تف‌کافت در هر زمان گرمادهی قابل تعیین است. همان‌طور که مشخص است، برای نمونه CA0.142-0.76 ناحیه تف‌کافت تا زمان ۴۵ s تا عمق ۷ mm توسعه می‌یابد. برای نمونه CA0.142-0.36 تا زمان مزبور، ناحیه تف‌کافت تا عمق ۱۳ mm توسعه یافته است. بنابراین، بر پایه نتایج مدل ریاضی کاهش چگالی رزین و سبک‌سازی فداشونده متخلخل سبب رخداد پدیده فدایش عمقی شده در حالی

فداشونده مطابقت داشت. بنابراین، می‌توان با استفاده از برنامه مزبور و با توجه به شرایط کاربری (محدویت دمای عمقی، زمان کاربرد و ضخامت فداشونده)، چگالی مناسب عایق را تخمین زد.

قدردانی

از حمایت‌های دانشکده مهندسی دانشگاه شهید چمران اهواز در انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود.

فداشونده می‌شود. مقایسه پاسخ گرمایی فداشونده‌های با چگالی 0.736 g/cm^3 و بررسی ریزساختار فداشونده‌ها، حاکی از تغییر سازوکار تخریب گرمایی از فدایش عمقی به فدایش سطحی با افزایش چگالی فداشونده بود. به بیان دیگر، با افزایش نسبت رزین به شبکه کربنی، سهم سازوکار فدایش سطحی نسبت به سازوکار عمقی افزایش می‌یابد. از طرفی، نتایج حاصل از آزمون فدایش با شعله اکسی‌استیلن، با نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نرم‌افزار Comsol Multiphysics، در تخمین دمای عمقی فداشونده‌ها در عمق ۲۵ و ۳۵ mm از سطح

علائم اختصاری

k_v (W/m.K)	رسانندگی گرمایی نمونه	ρ_{ch} (kg/m ³)	چگالی زغال
k_{ch} (W/m.K)	رسانندگی گرمایی زغال	ρ_g (kg/m ³)	چگالی گاز تفت کافت
c_{pv} (J/kg.K)	ظرفیت گرمایی	μ (Pa/s)	گرانروی گاز تفت کافت
$c_{p,ch}$ (J/kg.K)	ظرفیت گرمایی زغال	R_u (J/mol.K)	ثابت گاز
ΔT_p (J/kg.K)	گرمای تخریب پلیمر	M_g (kg/mol)	وزن مولکولی گاز تفت کافت
v_g (m/s)	سرعت گاز تفت کافت	P (N/m ²)	فشار
h_g (J/kg)	آنتالپی گاز تفت کافت	ϵ_g	تخلخل فداشونده
κ_v (m ²)	تراوایی نمونه	\dot{s} (m/s)	سرعت سطح
κ_{ch} (m ²)	تراوایی زغال	h_u (J/kg)	آنتالپی لایه مرزی
ω	درجه تخریب	T_s (K)	دمای سطح فداشونده
ρ_v (kg/m ³)	چگالی نمونه	σ (J/m ² .K ²)	ثابت بولتزمن

مراجع

- Lachaud D.J., Eekelen T., Scoggins J.B., Magin T.E., and Mansour N.N., Detailed Chemical Equilibrium Model for Porous Ablative Materials, *Int. J. Heat Mass Transfer.*, **90**, 1034-1045, 2015.
- Natali M., Kenny J.M., and Torre L., Science and Technology of Polymeric Ablative Materials for Thermal Protection Systems and Propulsion Devices: A Review, *Prog. Mater. Sci.*, **84**, 192-275, 2016.
- Bahramian A. and Seifi A. Evaluation of High Temperature Composites Thermal Properties under Different Heat Flux Conditions, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **27**, 151-160, 2014.
- Koo Joseph H., Wagner K., Pilato L.A., and Wu H., Polymer Nanocomposite Ablatives-Part III, *J. Compos. Sci.*, **9**, 127, 2025.
- Cho D., Lee J.Y., and Yoon B.I, Microscopic Observations of the Ablation Behaviors of Carbon Fiber/Phenolic Composites, *J. Mater. Sci. Lett.*, **12**, 1894-1896, 1993.
- Pelin G., Cristina-Elisabeta P., Adriana Ş., Ion D., Anton F., Ecaterina A., and Roxana T., Influence of Nanometric Silicon Carbide on Phenolic Resin Composites Properties, *Bull. Mater. Sci.*, **39**, 769-775, 2016.
- Li W., Jun L., and Jingran G., Novel Designs of Charring Composites Based on Pore Structure Control and Evaluation of Their Thermal Protection Performance, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **129**, 59-73, 2019.
- Park J., Dong K., Zuo-Jia W., Ga-Young G., and Lawrence D., Interfacial, Fire Retardancy, and Thermal Stability Evaluation of Graphite Oxide (GO)-Phenolic Composites with Different GO Particle Sizes, *Compos. Part B: Eng.*, **53**, 290-296, 2013.

9. Yang D., Yang G., Hongjun L., and Chengqi S., Thermal Shock Resistance of Bimodal Structured Thermal Barrier Coatings by Atmospheric Plasma Spraying Using Nanostructured Partially Stabilized Zirconia, *Surface Coat. Technol.*, **315**, 9-16, 2017.
10. Tran H., Johnson C., Rasky D., Hui F., Hsu M.T., and Chen Y., Phenolic Impregnated Carbon Ablators (PICA) for Discovery Class Missions, *31st Thermophysics Conference*, **32**, 1907-1911, 1996.
11. Desai P.N., Robert A.M., and McNeil C., Entry Dispersion Analysis for the Stardust Comet Sample Return Capsule, *J. Spacecraft and Rockets*, **36**, 463-469, 1999.
12. Willcockson M. and William H., Stardust Sample Return Capsule Design Experience, *J. Spacecraft and Rockets* **36**, 470-474, 1999.
13. Suzuki T., Kazuhisa F., Takeharu S., Kei I.O., Sumio K., and Seiji N., Thermal Response Analysis of Low-Density CFRP Ablator, *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan*, **10**, 21-30, 2012.
14. Okuyama K., Sumio K., and Hiroaki O., Thermochemical Performance of a Lightweight Charring Carbon Fiber Reinforced Plastic, *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, **56**, 159-169, 2013.
15. Szasz B., Keiichi O., Sumio K., and Takayuki S., Empirical Study of the Lightweight Ablator Series for Transfer Vehicle Systems (LATS), *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan*, **13**, 41-47, 2016.
16. Pavesi S., Pagen A.S., and Herdrich G., Systematic Comparative Analysis of Existing Ablative Materials for Thermal Protection Systems' Design Optimization, 68th International Astronautical Congress (IAC), Australia, 25-29 September, 2017.
17. Wang C., Xiangyu J., Cheng H., Changqing H., and Xinghong Z., Organic Aerogel-Impregnated Low-Density Carbon/Carbon Composites Preparation, Properties and Response under Simulated Atmospheric Re-Entry Conditions, *Mater. Design*, **131**, 177-185, 2017.
18. Cheng H., Changqing H., Xinghong Z., Huafei X., Songhe M., and Jiecai H., Super Flame-Retardant Lightweight Rime-Like Carbon-Phenolic Nano Foam, *Scientific Reports*, **6**, 33480, 2016.
19. Driver D., Michael O., Michael B., Matthew M., and Matthew M., Understanding High Recession Rates of Carbon Ablators Seen in Shear Tests in an Arc Jet, *48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, **56**, 1170-1177, 2010.
20. Kubota Y., Toshiaki F., Yusei K., Ryo, I., and Yasuo K., Thermal Protection Performance of Porous Carbon Ablators with Three Different Matrices, *J. Spacecraft and Rockets*, **55**, 1222-1229, 2018.
21. Natali M., Puri I., Kenny M., Torre L., and Rallini M., Microstructure and Ablation Behavior of an Affordable and Reliable Nanostructured Phenolic Impregnated Carbon Ablator (PICA), *Polym. Degrad. Stab.*, **141**, 84-96, 2017.
22. Madadi M., Bahramian A.R., and Hadizade Raeisi H., Improvement in Ablation and Thermal Properties of Ultra-lightweight Silicone/Cork Composites Insulator Using Novolac Aerogel, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **30**, 517-529, 2018.
23. Kobayashi Y., Sakai T., Okuyama K., Suzuki T., Fujita F., Kato S., and Kitagawa K., An Experimental Study on Thermal Response of Low Density Carbon-Phenolic Ablators, *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, 1587, 2009.
24. Li W., Zhang J., Dong Fang G., Jie Li W., Liang J., and He Meng S., Evaluation of Numerical Ablation Model for Charring Composites., *Sci. China Technol. Sci.*, **62**, 1322-1330, 2019.
25. Hong C., Jiecai H., and Xinghong Z., Novel Phenolic Impregnated 3-D Fine-Woven Pierced Carbon Fabric Composites: Microstructure and Ablation Behavior, *Compos: Part B: Eng.*, **43**, 2389-2394, 2012.
26. Allahbakhsh A. and Bahramian A.R., Novolac-Derived Carbon Aerogels Pyrolyzed at High Temperatures: Experimental and Theoretical Studies, *RSC Adv.*, **76**, 72777-72790, 2016.
27. Zhu Y., Jun F., Yi Meng S., Zhuo L., Pan W., and Zhang J., Multiphysical Behavior of a Lightweight Ablator: Experiments, Modeling, and Analysis., *J. Spacecraft and Rockets*, **55**, 106-115, 2018.
28. Naseri I., Kazemi A., Bahramian A.R., and Razzaghi Kashani M., Preparation of Organic and Carbon Xerogels Using High-Temperature-Pressure Sol-Gel Polymerization, *Mater. Design*, **61**, 35-40, 2014.
29. Allahbakhsh A., and Bahramian A.R., Self-Assembled and Pyrolyzed Carbon Aerogels: An Overview of Their Preparation Mechanisms, Properties and Applications, *Nanoscale* **34**, 14139-14158, 2015.
30. Seraji M.M., and Arefazar A., Thermal Ablation-Insulation Performance, Microstructural, and Mechanical Properties of Carbon Aerogel Based Lightweight Heat Shielding Composites, *Polym. Eng. Sci.*, **61**, 1338-1352, 2021.

31. Seraji M.M., Arefazar A., and Seifi A., Non-parametric Kinetic Analysis of the Thermal Oxidation Process of Novolac-Derived Carbon-Clay Nanocomposite Aerogels, *Mater. Today Commun.*, **44**, 111973, 2025.
32. Sasaki S., Ishikawa Y.A., Kogo T., and Ogasawara Y., Ishida Fabrication and Characterization of Ultra-Lightweight Ablator Using Porous Carbon Materials, *Proceeding of 16th European Conference on Composite Material*, **326**, 1479-1482, 2014.
33. Lachaud J., Ioana C., and Nagi N.M., Multiscale Approach to Ablation Modeling of Phenolic Impregnated Carbon Ablators, *J. Spacecraft and Rockets*, **46**, 910-921, 2010.
34. Allahbakhsh A. and Bahramian A.R., Novolac-Derived Carbon Aerogels Pyrolyzed at High Temperatures: Experimental and Theoretical Studies, *RSC Adv.*, **76**, 72777-72790, 2016.
35. Tian Y., Haiming H., and Xiaoliang X., Curing Kinetics and Curing Process of Phenolic Impregnated Carbon Ablator, *J. Appl. Polym. Sci.*, **134**, 454-460, 2017.
36. Pekala R.W., Alviso C.K., and LeMay J.D., Organic Aerogels: Microstructural Dependence of Mechanical Properties in Compression, *J. Non-Crystalline Solids*, **125**, 67-75, 1990.
37. Bahramian A.R., Pyrolysis and Flammability Properties of Novolac/Graphite Nanocomposites, *Fire Safety J.*, **61**, 265-273, 2013.