



Available in:
Journal.isrc.ac.ir

Journal of
Space Science, Technology
& Applications (Persian)

Vol. 3, No. 2, pp.: 154-167
2024

DOI:
10.22034/jssta.2024.424941.1144

Article Info

Received: 2023-11-12
Accepted: 2024-02-19

Keywords

Ion mobility spectrometry,
Experimental investigation,
Temperature gradient, Warm-
up time, Desorber, Thermal
insulation

How to Cite this article

Hamed Sheikhbahae, et al.,
Experimental investigation and
optimization of thermal
performance of ion mobility
spectrometry cell”, *Journal of
Space Science, Technology and
Applications*, vol 3(2), p.:154-
167 , 2024.

Experimental investigation and optimization of thermal performance of ion mobility spectrometry cell

Hamed Sheikhbahae^{1*}, Farkhondeh Saliminezhad², Seyed Alireza Ghorashi³,
Saeed Hajjaligol⁴

^{1*}M.Sc., Institute of Materials and Energy, Iranian Space Research Center, Isfahan, Iran
h.sheikhbahaei@isrc.ac.ir

² M.Sc., Institute of Materials and Energy, Iranian Space Research Center, Isfahan, Iran
f.saliminezhad@isrc.ac.ir

³ Instructor, Institute of Materials and Energy, Iranian Space Research Center, Isfahan, Iran
sa.ghorashi@isrc.ac.ir

⁴ Ph.D., Institute of Materials and Energy, Iranian Space Research Center, Isfahan, Iran
s.hajjaligol@isrc.ac.ir

Abstract

Ion mobility spectroscopy (IMS), as one of the detection methods based on the ionization of mineral, organic, and chemical substances, has been used efficiently for many years in manned and robotic space missions. The space applications of these instruments include environmental monitoring of spacecraft and the identification of organic and mineral substances in samples collected from space. In this method, warm-up is required for the cleanup and transport of ions in the drift area of the detector cell. Considering the need to miniaturize and optimize the necessary power of space detectors, the experimental investigation of the thermal gradient and factors affecting warm-up time is essential. For conducting the experimental thermal analysis of the IMS cell, micropumps, desorber, and temperature recording equipment such as a temperature control system, data logger, thermocouple sensors, monitoring system, and resistance temperature detector have been used. In this research, by experimentally investigating the warm-up time and thermal gradient in the IMS cell in different modes and at several target temperatures, the main factors have been determined. The results showed that the oscillating air flow inside the IMS cell can reduce the warm-up time and the temperature gradient. Finally, several suggestions for better thermal efficiency are presented.



بررسی تجربی و بهینه‌سازی عملکرد حرارتی سلول طیف‌سنج تحرک یونی

دسترس پذیر در نشانی:
Journal.isrc.ac.ir

حامد شیخ بهائی^{۱*}، فرخنده سلیمی نژاد^۲، سید علیرضا قرشی^۳، سعید حاجی علی گل^۴

دو فصلنامه

علوم، فناوری و
کاربردهای فضایی

- ۱- *کارشناسی‌ارشد، پژوهشکده مواد و انرژی، پژوهشگاه فضایی ایران، اصفهان، ایران، h.sheikhbahaei@isrc.ac.ir
۲- کارشناسی‌ارشد، پژوهشکده مواد و انرژی، پژوهشگاه فضایی ایران، اصفهان، ایران، f.saliminezhad@isrc.ac.ir
۳- مربی، پژوهشکده مواد و انرژی، پژوهشگاه فضایی ایران، اصفهان، ایران، sa.ghorashi@isrc.ac.ir
۴- دکتری، پژوهشکده مواد و انرژی، پژوهشگاه فضایی ایران، اصفهان، ایران، s.hajjaligol@isrc.ac.ir

* نویسنده مسئول

سال سوم، شماره ۲، صفحه ۱۶۷-۱۵۴
پاییز و زمستان ۱۴۰۲

DOI:
10.22034/jssta.2024.424941.1144

چکیده

طیف‌سنجی تحرک یونی به عنوان یکی از روش‌های آشکارسازی بر اساس یونیزاسیون مواد معدنی، آلی و شیمیایی در ماموریت‌های سرنشین‌دار و رباتیک فضایی، سال‌ها به‌طور کارآمدی مورد استفاده قرار گرفته است. کاربردهای فضایی این ابزارها، شامل پایش محیطی فضاپیماها و همچنین شناسایی مواد آلی و معدنی در نمونه‌های گردآوری‌شده از کیهان می‌باشد. در این بین، جهت پاک‌سازی و انتقال یون‌ها در ناحیه رانش سلول آشکارساز، نیاز به گرمایش وجود دارد. با توجه به نیاز به کوچک‌سازی و بهینه‌سازی توان مورد نیاز آشکارسازهای فضایی، بررسی تجربی گرادیان حرارتی و عوامل موثر بر آن بسیار اهمیت دارد. جهت انجام بررسی تجربی حرارتی سلول، برنامه و تجهیزات ثبت دما همچون سامانه کنترل دما، ثبت‌کننده اطلاعات، حسگرهای ترموکوپل، نمایشگر، حسگر دمای مقاومتی و همچنین اجزای اصلی سیستم آشکارساز شامل واجذب‌کننده و میکروپمپ‌ها استفاده شده است. در این پژوهش، با بررسی تجربی زمان گرمایش و گرادیان حرارتی موجود در سلول طیف‌سنج تحرک یونی در حالت‌های مختلف و چندین دمای هدف، عوامل موثر بر آن شناسایی شد. نتایج نشان داد، ایجاد جریان نوسانی هوا درون سلول می‌تواند موجب کاهش گرادیان دمایی و زمان رسیدن به پایداری حرارتی شود. در نهایت، راهکارهایی برای بهینه‌سازی حرارتی ارائه شده است.

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۲۱

پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۳۰

واژه‌های کلیدی

تجربی، گرادیان دمایی، زمان
گرمایش، واجذب‌کننده، عایق
حرارتی

نحوه استناد به این مقاله

حامد شیخ بهائی و همکاران، "بررسی تجربی و بهینه‌سازی عملکرد حرارتی سلول طیف‌سنج تحرک یونی"، دو فصلنامه علوم، فناوری و کاربردهای فضایی، جلد سوم، شماره دوم، صفحات ۱۵۴-۱۶۷، ۱۴۰۲.

مقدمه

طیف‌سنجی تحرک یونی^۱ یک روش تحلیلی است که برای تشخیص احتمالی یک ماده بر اساس تحرک یون‌های محصول در یک میدان الکتریکی استفاده می‌شود [۱ و ۲]. طیف‌سنجی تحرک یونی به‌طور کارآمدی برای نظارت بر کیفیت هوای فضاپیماهای سرنشین‌دار از جمله ایستگاه فضایی بین‌المللی و شاتل فضایی که راهگشای مأموریت‌های پیش‌رو همچون بازگشت به ماه و سفر به مریخ می‌باشد، به‌کار گرفته شده است. علاوه بر این، سامانه‌های طیف‌سنجی پیشرفته برای تشخیص نشتی بخارات هیدرازین در شاتل فضایی و شناسایی مواد آلی فرار در هوای فضاپیماها استفاده شده‌اند. از سوی دیگر، تجزیه و تحلیل نمونه‌های آلی و معدنی جمع‌آوری‌شده از مأموریت‌های سرنش‌ین‌دار و رباتیک و همچنین انجام تحقیقات در محل و از راه دور طی اکتشافات فضایی، به‌منظور درک چگونگی تکامل حیات و شکل‌گیری منظومه خورشیدی به‌وسیله آشکارسازهای طیف‌سنجی تحرک یونی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۳].

در این روش آشکارسازی، تجزیه و تحلیل زمانی آغاز می‌شود که نمونه به قسمت نمونه‌بردار طیف‌سنج تحرک یونی نزدیک می‌شود. در این زمان، نمونه تبخیر می‌شود و سپس توسط یک گاز حامل به محفظه واکنش، جایی که مولکول‌های گازی یونیزه می‌شوند، منتقل می‌شود [۴ و ۵]. سپس یون‌های ایجاد شده از طریق یک دریچه یونی به ناحیه رانش یا جداسازی وارد می‌شوند. به ناحیه رانش^۲ و دریچه یونی اصطلاحاً سلول طیف‌سنج تحرک یونی گفته می‌شود [۶]. در ناحیه رانش، گروه یونی تحت تأثیر میدان الکتریکی به سمت آشکارساز حرکت می‌کند. همانطور که یون‌ها تحت تأثیر این میدان الکتریکی به سمت آشکارساز حرکت می‌کنند، در اثر برخورد با مولکول‌های گاز رانش که در جهت مخالف حرکت می‌کنند، سرعت آن‌ها کاهش می‌یابد [۷ و ۸]. مهم‌ترین بخش یک طیف‌سنج تحرک یونی لوله رانش آن است که بین دریچه یونی و صفحه آشکارساز قرار گرفته است. این ناحیه معمولاً از یک سری حلقه‌های^۳ رسانا و عایق متناوب (ضخامت آن‌ها در طرح‌های مختلف متفاوت است) تشکیل شده است که روی هم چیده شده‌اند تا یک لوله با طول دلخواه را تشکیل دهند. گونه‌های یونی که جرم کمتر، سطح برخورد کوچک‌تر و بار بیشتری دارند، سریع‌تر به آشکارساز

می‌رسند. با اندازه‌گیری و تقویت جریان الکتریکی بس‌یار ضعیف (در حد پیکوآمپر) ناشی از برخورد یون‌ها با آشکارساز ذرات و مقایسه با مرجع، نوع ماده مورد آزمایش مشخص می‌شود [۹ و ۱۰].

اندازه‌گیری پارامترهای دستگاہی، منبع مهمی از عدم قطعیت‌ها در طول آزمایش‌های تحرک یونی است. گرما باعث عدم قطعیت‌های مهم در اندازه‌گیری‌های تحرک یونی می‌شود [۱۱]. دما دو اثر عمده بر روی یون در سطح رطوبت ثابت دارد. در دماهای بالا، بسته به آنالیت‌های^۴ مختلف، جدایش مولکول‌های آب از خوشه یون محصول و تکه‌تکه‌شدن یون‌های محصول ممکن است رخ دهد تا یون‌های کوچک‌تر با تحرک بیش‌تر تشکیل شوند. بنابراین، یون محصول شناسایی‌شده در دمای اتاق ممکن است همان یون شناسایی‌شده در دمای بالا حتی برای همان آنالیت نباشد. همچنین، دایمر متصل به پروتون و تریمر متصل به پروتون (یون‌های تشکیل‌شده تحت غلظت‌های بالایی از آنالیت) اکثر ترکیبات، در صورتی که دما به ترتیب بالای ۸۰ تا ۱۰۰ درجه سلسیوس و ۲۰- تا ۰ درجه سلسیوس باشد، به شکل یون مونومر تجزیه می‌شوند. بنابراین هویت آن‌ها هرگز حفظ نمی‌شود [۱۲ و ۱۳ و ۱۴]. علاوه بر این، اگر دمای لوله رانش طیف‌سنج تحرک یونی همگن نباشد، می‌تواند یون‌هایی با ساختارهای متفاوت ایجاد شود که باعث خطا در شناسایی ماده مورد نظر خواهد شد. بنابراین، اعمال دمای ثابت و یکنواخت در لوله رانش به شدت بر عملکرد دستگاہ تحرک یونی اثر دارد [۱۱ و ۱۵]. در این راستا، لیل‌بیگی و تبریزی تأثیر پارامتر دما را بر قدرت تفکیک طیف‌سنج تحرک یونی مورد مطالعه قرار دادند و به‌طور تجربی و نظری نشان دادند که قدرت تفکیک با جذر دمای گاز رانش نسبت معکوس دارد، به عبارت دیگر با افزایش دما قدرت تفکیک کاهش می‌یابد [۱۶]. ناجارو و همکارانش دمای بهینه واجذب‌کننده^۵ چند ترکیب شیمیایی خاص برای رسیدن به بهترین تفکیک را بررسی نمودند [۱۷]. همچنین در پژوهشی دیگر، علی‌کرد و همکارانش دمای بهینه سلول طیف‌سنج تحرک تفاضلی^۶ را برای استفاده در صنایع غذایی برای غربال‌گری پوترسین^۷ و کاداورین^۸ بررسی و مطالعه نمودند [۱۸]. مرنبلوم و همکارانش دمای یون‌ها را در فرآیند طیف‌سنجی تحرک یونی

^۵ Desorber

^۶ Differential Mobility Spectrometry (DMS)

^۷ Putrescine

^۸ Cadaverine

^۱ Ion Mobility Spectrometry (IMS)

^۲ Drift Tube

^۳ Rings

^۴ Analyte

موج انتقالی^۹ بررسی و دمای بهینه را برای رسیدن به بهترین تفکیک برای گاز هلیوم به دست آوردند [۱۹].

علاوه بر اعمال دمای ثابت و یکنواخت در طراحی و ساخت لوله‌های رانش، موضوع دیگری که برای سازندگان دستگاه برای کاربردهای فضاپلیه اهمیت دارد، کاهش زمان گرمایش و آماده‌شدن دستگاه برای آنالیز می‌باشد. این امر باعث می‌شود تا مصرف انرژی دستگاه کاهش یابد. با توجه به اینکه تاکنون بررسی حرارتی در رابطه با دمای هوای درون سلول طیف‌سنج تحرک یونی به صورت سیستماتیک و جامع صورت نگرفته و اندازه‌گیری حرارتی بیشتر از طریق اجزاء و بدنه سلول انجام پذیرفته است، از این رو، هدف این پژوهش، بررسی تجربی گرادیان دمایی^{۱۰}، اتلاف حرارتی^{۱۱}، زمان گرمایش^{۱۲} و عوامل موثر بر آن از طریق بررسی هوای درون سلول، برای بهینه‌سازی طیف‌سنج تحرک یونی در نظر گرفته شده است.

۲- روش‌ها

سلول طیف‌سنج تحرک یونی شامل تعدادی حلقه تفلونی (عایق) و فلزی (رسانا) مشابه به صورت یکی در میان، منبع یونیزاس یون و حلقه نگهدارنده، پنجره‌های یونی^{۱۳}، جریان‌روب^{۱۴} (آشکارساز الکتریکی یون)، حلقه‌های ورودی و انتهای و اتصالات شامل پیچ، مهره و ... می‌باشد. بر روی حلقه‌های فلزی مقاومت الکتریکی برای ایجاد میدان الکتریکی قرار گرفته و سلول به وسیله گرم‌کن سیمی سیلیکونی^{۱۵} (پیچیده شده بر روی سلول) گرم‌شده و توسط پوشش تفلون از نظر حرارتی عایق شده است. علاوه بر سلول طیف‌سنج تحرک یونی، در یک دستگاه آشکارساز، اجزایی دیگر نظیر واجذب‌کننده، میکروپمپ‌ها، منبع تغذیه

الکتریکی، مدارات الکترونیک، بدنه، نمایشگر و ... وجود دارد. در این بین، واجذب‌کننده، که به حلقه ورودی سلول متصل می‌شود، امر تبدیل ذرات جمع‌آوری‌شده به بخار به وسیله گرم‌کن درونی را انجام داده و میکروپمپ‌ها وظیفه انتقال بخار ذرات در طول محفظه رانش طیف‌سنج تحرک یونی و همچنین پاک‌کردن محفظه برای فرآیند آشکارسازی بعدی را بر عهده دارند. در شکل ۱ نمایی از سلول طیف‌سنج تحرک یونی و واجذب‌کننده به همراه حسگرهای مورد استفاده در آزمون حرارتی نمایش داده شده است.

به منظور انجام بررسی تجربی حرارتی سلول طیف‌سنج تحرک یونی، نیازمند تجهیزات ثبت دما مبتنی بر زمان، همچون واحد کنترل دما^{۱۶}، ثبت‌کننده اطلاعات^{۱۷}، حسگرهای ترموکوپل^{۱۸}، نمایشگر و حسگرهای دقیق آشکارساز دمای مقاومتی^{۱۹} است. تنظیم دقیق حسگرهای ترموکوپل با استفاده از آب با دمای کنترل‌شده در کنار حسگرهای دقیق آشکارساز دمای مقاومتی انجام می‌شود. همچنین شرایط اتاق از نظر دما و رطوبت در حالت پایدار استاندارد در نظر گرفته شده است. برای بررسی گرادیان دما در طول سلول، حلقه‌های تفلونی با دقت در راستای ضخامت با قطر ۱ میلی‌متر سوراخ‌کاری شده و حسگر دما با عبور از سوراخ در میانه قطر محفظه رانش قرار می‌گیرد. در شکل ۲ اجزای درونی سلول طیف‌سنج تحرک یونی و موقعیت حسگرهای دما نشان داده شده است.

¹⁵ Silicone Heating Wire

¹⁶ Temperature Control Module

¹⁷ Data Logger

¹⁸ Thermocouple Sensors

¹⁹ Resistance Temperature Detector (RTD)

⁹ Traveling Wave Ion Mobility Spectrometry (TWIMS)

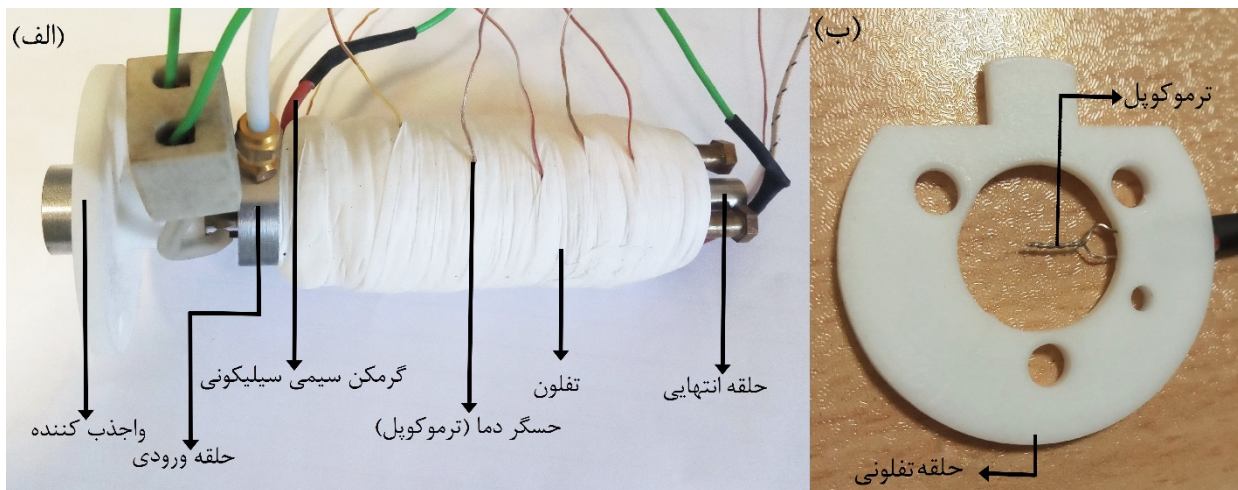
¹⁰ Temperature Gradient

¹¹ Heat Loss

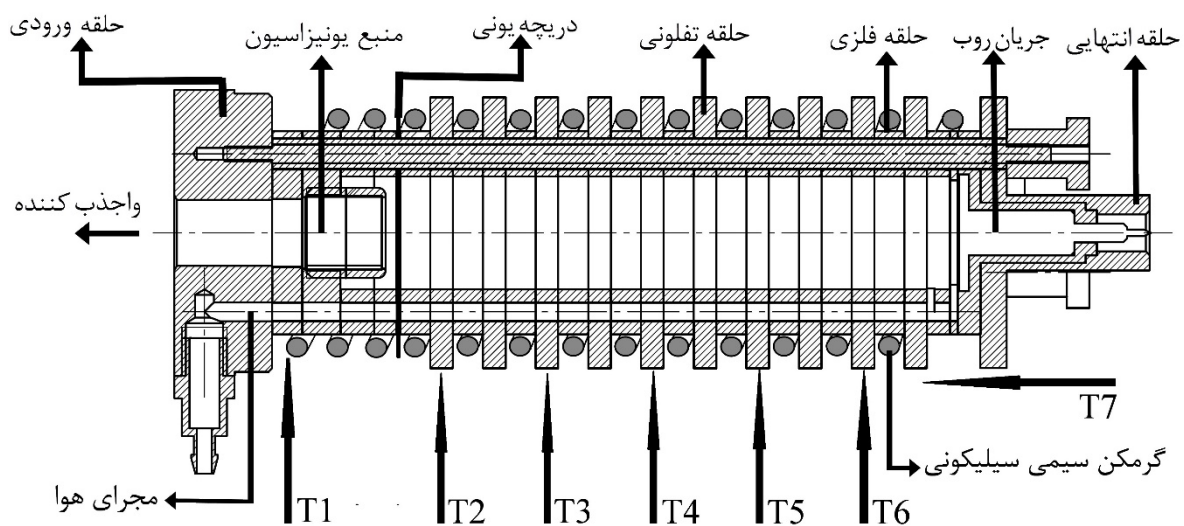
¹² Warm-up Time

¹³ Shutter Grid

¹⁴ Collector



شکل (۱): (الف) سلول طیف‌سنج تحرک یونی، (ب) حسگر حرارتی تعبیه شده در حلقه تفلونی



شکل (۲): موقعیت قرارگیری حسگرهای حرارتی درون و خارج از سلول طیف‌سنج تحرک یونی

جدول (۲): مشخصات آزمون‌های حرارتی

شماره آزمون	دمای هدف (سلسیوس)	کن گرم سلول	کننده‌وا جذب	پمپ دمنده	پمپ مکنده	پروفیل دمایی
۱	۱۲۰	√	-	-	-	-
۲	۱۲۰	√	√	-	-	-
۳	۱۲۰	√	√	√	-	-
۴	۱۳۰	√	√	√	-	-
۵	۱۴۰	√	√	√	-	-
۶	۱۲۰	√	√	√	√	-
۷	۱۲۰-۱۴۰-۱۳۰	√	√	√	-	√

طی آزمون حرارتی، حسگرهای ترموکوپل اختلاف پتانسیل الکتریکی وابسته به دما را از سلول به ثبت‌کننده اطلاعات منتقل می‌کنند. سامانه پایش دمای سلول، داده‌های دما را از ثبت‌کننده اطلاعات دریافت کرده و با استفاده از برنامه متلب آن را به نمودار تبدیل می‌کند. با روشن شدن گرم‌کن سیمی سلیکونی، دمای سلول و هوای درون آن به تدریج افزایش‌یافته، تا به دمای تنظیمی واحد کنترل دما رسیده و ثابت شود. در این حال، دمای نشان داده شده به وسیله حسگر شماره ۷ (که در کنار حسگر واحد کنترل دما نصب شده) دمای سطح بیرونی سلول و همچنین دقت اندازه‌گیری دما توسط حسگرهای ترموکوپل را نشان می‌دهد. در شکل ۳، نمایی از پیکربندی این آزمون و تجهیزات مورد استفاده شامل ثبت‌کننده اطلاعات، سلول، حسگرهای دما و سامانه پایش دما نشان داده شده است.

در جدول ۱ حسگرهای دمای مورد استفاده و نوع و موقعیت محل نصب آن‌ها مشخص شده است.

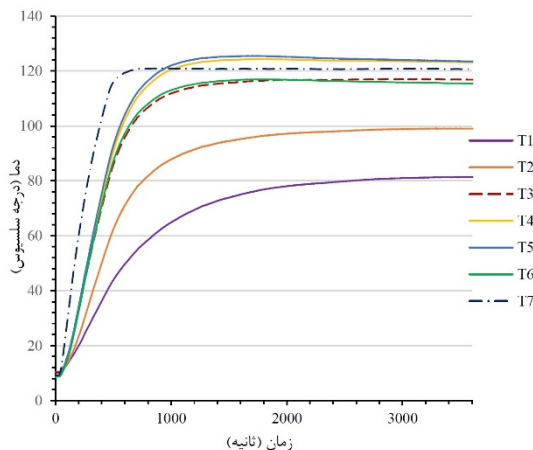
جدول (۱): حسگرهای دما در بررسی تجربی حرارتی

حسگر دما	نوع	موقعیت
حسگر شماره ۱	K	حلقه ورودی سلول، بعد از واجذب کننده
حسگر شماره ۲	K	حلقه تفلونی میانی ۱
حسگر شماره ۳	K	حلقه تفلونی میانی ۳
حسگر شماره ۴	K	حلقه تفلونی میانی ۵
حسگر شماره ۵	K	حلقه تفلونی میانی ۷
حسگر شماره ۶	K	حلقه تفلونی میانی ۹
حسگر شماره ۷	K	سطح بیرونی سلول، در کنار حسگر واحد کنترل دما
حسگر واحد کنترل دما	K	سطح بیرونی سلول، در کنار حسگر شماره ۷
حسگر تنظیم دما شماره ۱	RTD	بیرون از سلول، دمای اتاق
حسگر تنظیم دما شماره ۲	RTD	بیرون از سلول، دمای اتاق

پس از تنظیم دقیق درجه‌بندی^{۲۰} حسگرهای نصب‌شده در داخل سلول برای انجام آزمون‌های زمان و گرادیان حرارتی، بایستی ابتدا دمای سلول به دمای محیط (۲۰ درجه سلسیوس) رسیده، سپس آزمون حرارتی شروع شود. مشخصات آزمون‌های حرارتی در جدول ۲ به اختصار بیان شده است.



شکل (۳): تجهیزات مورد استفاده در بررسی تجربی عملکرد حرارتی



شکل (۴): تغییرات دما بر حسب زمان در سلول (آزمون شماره ۱)

همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، بعد از گذشت ۷ دقیقه دمای گرم‌کن (حسگر شماره ۷) در سطح بیرونی سلول به ۱۲۰ درجه سلسیوس می‌رسد و بعد از آن به وسیله واحد کنترل دما، ثلثت می‌شود. در عین حال، درون سلول، گرادیان دمای نسبتاً بالایی وجود داشته و دمای ورودی از ۸۰ تا ۱۰۰ درجه سلسیوس بیشتر تجاوز نمی‌کند و در قسمت میانی سلول بیشترین دما وجود داشته که تا ۱۲۳ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد و دوباره در انتهای دیگر دما افت می‌نماید. گرادیان دمای در دو انتهای سلول به دلیل در معرض بودن حلقه‌های فلزی ورودی و انتهای سلول با محیط پیرامون می‌باشد، که اتلاف حرارتی بالایی داشته و باعث کاهش دما در این نقاط نسبت به میانه سلول می‌شود. در این بین کاهش دما در حلقه ورودی به دلیل ارتباط با هوای خارج نسبت به انتهای دیگر بیشتر است.

در شکل ۵ تغییرات دمایی هوای درون سلول با روشن بودن گرم‌کن واجذب‌کننده و خاموش بودن میکروپمپ‌ها در طی آزمون شماره ۲ (دمای تنظیمی واحد کنترل دما ۱۲۰ درجه سلسیوس) نشان داده شده است. دمای واجذب‌کننده که به شکل مقاومت سیمی فنی و غیرتماسی می‌باشد در حدود ۲۰۰ درجه سلسیوس است. همان‌که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، در این حالت با انتقال دما از طریق رسانش و بدنه دستگاه دمای ورودی سلول نسبت به حالت قبل تا ۲۰ درجه سلسیوس افزایش پیدا کرده است. با روشن‌شدن واجذب‌کننده، حلقه ورودی که به واجذب‌کننده متصل می‌باشد، هم‌زمان گرم‌شده و اختلاف دمایی در دو انتهای سلول کاهش می‌یابد.

۳- نتایج و بحث

برای گرمایش هوای درون سلول، با استفاده از گرم‌کن سیمی سیلیکونی، حرارت از طریق بدنه و رسانش به محفظه رانش منتقل شده و موجب می‌گردد تا دمای هوای محفظه رانش افزایش یابد. حسگر شماره ۷ به کمک واحد کنترل دما، دمای بدنه را در یک دمای ثابت قرار می‌دهد که دمای هدف نامیده شده و با دمای هوای داخل سلول ممکن است اختلاف داشته باشد. در رابطه با دمای هوای محفظه رانش بایستی در نظر داشت در دماهای بسیار پایین تحرک یون‌ها کمتر از میزان مورد نیاز برای تفکیک و شناسایی بوده و زمانی که دما بسیار بالا رود احتمال یونیزاسیون بیشتر ماده وجود دارد که می‌تواند با مولکول‌های هوا واکنش داده و در نتیجه بر ضرایب تحرک یونی اثر گذارد. در دماهای بالا به دلیل غیرخطی‌شدن ضریب تحرک یونی امکان شناسایی وجود ندارد. همچنین یون‌هایی که در دماهای بالا تشکیل می‌شوند می‌توانند با هم برخورد کرده و یک‌سری مولکول‌های جدیدی ایجاد کنند که از لحاظ وزن مولکولی کاملاً با ماده اولیه متفاوت بوده و بر روی تحرک یونی اثر گذار باشد. از این رو، بهترین دما، دمایی است که مولکول فقط به صورت حداقل یون‌ها با تحرک کافی تشکیل شود تا نشانگر^{۲۱} مولکول کاملاً واضح^{۲۲} و بتواند به عنوان نشانگر اصلی قابل استناد باشد. بر حسب تجربه و با توجه به ساختار سلول موجود، بهترین تفکیک برای طیف‌سنجی در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس حاصل می‌شود [۸].

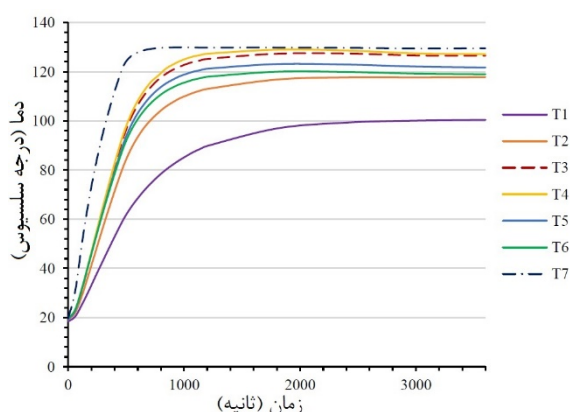
ثبت دما برای به دست‌آوردن گرادیان حرارتی در طول سلول آشکارساز و همچنین مشخص نمودن زمان لازم به منظور رسیدن به پایداری حرارتی برای هر یک از نقاط سلول با استفاده از چندین آزمایش تجربی که به تشریح در ذیل می‌آید، انجام شده است. در ابتدا، طی آزمون شماره ۱، بررسی نحوه ایجاد گرادیان دما درون سلول بدون روشن بودن واجذب‌کننده و تنها با روشن نمودن گرم‌کن سلول (دمای تنظیمی واحد کنترل دما ۱۲۰ درجه سلسیوس) بررسی شده است. شکل ۴ تغییرات دمای به دست‌آمده از حسگرهای دما در طی یک ساعت را نشان می‌دهد.

²² Sharp

²¹ Peak

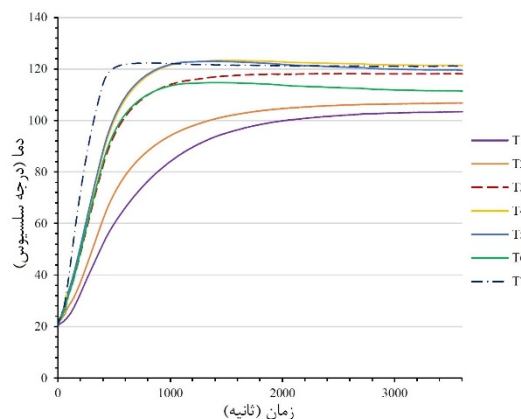
ورودی سلول کاهش می‌یابد. با این حال، این جریان هوا موجب می‌شود تا گرادیان دمایی درون ناحیه رانش از حسگر شماره ۲ تا ۶ تا حدی کاهش یابد. دلیل کاهش دما در حسگر شماره ۱ در حلقه ورودی، مربوط به کاهش حرارت ورودی از واجذب‌کننده به ناحیه حسگر شماره ۱ می‌باشد که در آزمون شماره ۲ موجب افزایش دمای این ناحیه در غیاب جریان هوای ناشی از میکروپمپ دمیده شده بود.

به منظور بررسی تاثیر افزایش سطح دمای هدف بر روی پارامترهای حرارتی سلول طیف‌سنجی، آزمون‌های ۴ و ۵ با دمای هدف ۱۳۰ و ۱۴۰ درجه سلسیوس طراحی و انجام شد. گرادیان دما در شرایطی که میکروپمپ دمیده و اجزای حرارتی شامل گرم‌کن سلول و واجذب‌کننده روشن می‌باشد (برای پاک‌سازی محفظه رانش با دمای هدف ۱۳۰ درجه سلسیوس) در شکل ۷ (آزمون شماره ۴) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، افزایش سطح دمای هدف تاثیر چندانی در گرادیان حرارتی در طول سلول ندارد، اما باعث می‌شود دمای هوای سلول (به جز در ناحیه حلقه ورودی) در محدوده دمایی با میانگین ۱۲۰ درجه سلسیوس قرار گیرد.



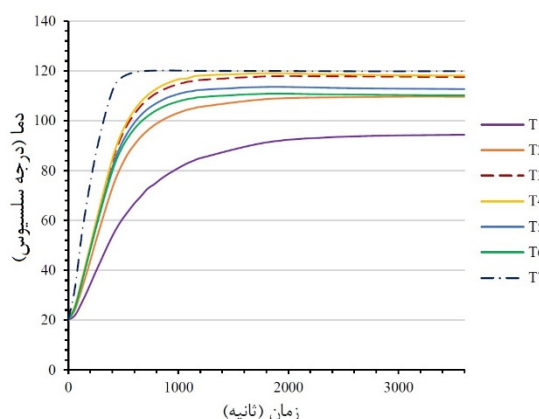
شکل (۷): تغییرات دما بر حسب زمان در سلول (آزمون شماره ۴)

علاوه بر این، گرادیان دما در شرایطی که میکروپمپ دمیده و اجزای حرارتی شامل گرم‌کن سلول و واجذب‌کننده روشن است (برای پاک‌سازی محفظه رانش) و دمای هدف برابر با ۱۴۰ درجه سلسیوس می‌باشد، در شکل ۸ (آزمون شماره ۵) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، افزایش سطح دمای هدف تاثیر بر روی گرادیان دمایی نداشته و تنها میانگین دمای هوای سلول (به جز در ناحیه حلقه ورودی) در محدوده دمایی با میانگین ۱۳۰ درجه سلسیوس قرار می‌دهد.



شکل (۵): تغییرات دما بر حسب زمان در سلول (آزمون شماره ۲)

در ادامه، طی آزمون شماره ۳ تا ۶ میکروپمپ‌ها که وظیفه پاک‌سازی محفظه رانش (میکروپمپ دمیده) و همچنین انتقال نمونه‌ها به داخل محفظه رانش (میکروپمپ مکند) را بر عهده دارند، به پیکربندی آزمون‌ها اضافه می‌شوند. این میکروپمپ‌ها (شامل دو عدد مشابه ۱۲ ولت با دور قابل تنظیم و حداکثر دبی ۲ لیتر بر دقیقه) خارج از سلول طیف‌سنجی و داخل سامانه آشکارساز قرار داشته و با لوله تفلونی جهت انتقال هوا به مجرای ورودی و خروجی متصل می‌شوند. تغییرات دما در شرایطی که میکروپمپ دمیده و اجزای حرارتی شامل گرم‌کن سلول و واجذب‌کننده روشن می‌باشد (جهت پاک‌سازی محفظه رانش) و دمای هدف برابر با ۱۲۰ درجه سلسیوس می‌باشد، در شکل ۶ (آزمون شماره ۳) نشان داده شده است.

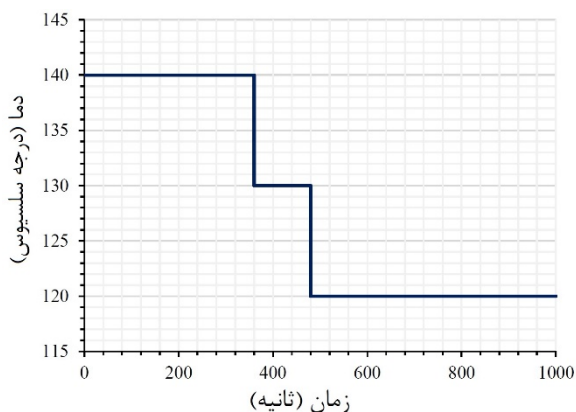


شکل (۶): تغییرات دما بر حسب زمان در سلول (آزمون شماره ۳)

مطابق شکل ۶ و در مقایسه با شکل ۵، با روشن‌شدن میکروپمپ دمیده و ایجاد جریان هوا درون سلول، دمای هوای در

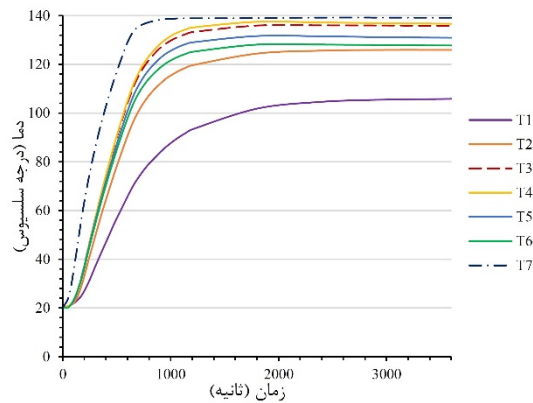
همان‌طور که در شکل ۹ قابل مشاهده است، ایجاد حالت دمشی - مکشی به وسیله میکروپمپ‌ها و جریان نوسانی هوا درون سلول به تدریج باعث افزایش ماندگاری هوا درون سلول و به دنبال آن افزایش انتقال حرارت از بدنه به هوای درون سلول می‌شود. این حالت، باعث افزایش تدریجی دمای سلول به ویژه در ورودی سلول و نزدیک به واجذب‌کننده مطابق شکل ۹ می‌شود. در نهایت این موضوع، منتج به کاهش گرادیان دمایی و زمان رسیدن به پایداری حرارتی تا حدود ۳۲ درصد می‌شود.

در آخر، تاثیر پروفیل حرارتی بر عملکرد حرارتی سلول بررسی شده است. گرادیان دمای ایجاد شده در شرایطی که دمای تنظیمی واحد کنترل دما مطابق پروفیل شکل ۱۰ (۱۰۰۰ ثانیه ابتدایی نشان داده شده است)، به شکل پله‌ای تغییر می‌کند، در طی آزمون شماره ۷ نشان داده شده است. این آزمون حرارتی در شرایطی که همه اجزای حرارتی روشن بوده (میکروپمپ دمنده) و دمای تنظیمی نخستین ۱۴۰ درجه سلسیوس، در دقیقه ۶ (۳۶۰ ثانیه) برابر با ۱۳۰ درجه سلسیوس و از دقیقه ۸ (۴۸۰ ثانیه) به بعد برابر با ۱۲۰ درجه سلسیوس بوده، انجام شده است.



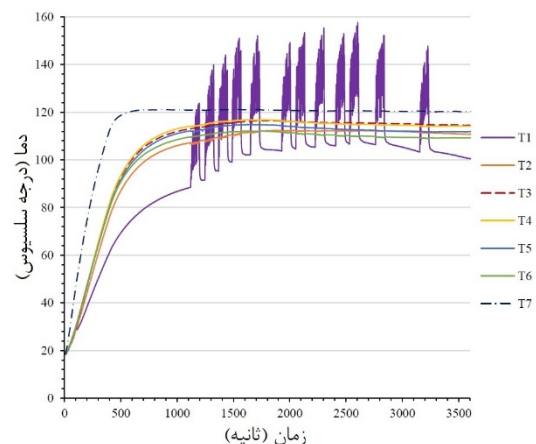
شکل (۱۰): پروفیل دمایی انتخابی (آزمون شماره ۷)

در شکل ۱۱ گرادیان دمای حاصل از پروفیل دمایی انتخابی در طول محفظه رانش سلول طیف‌سنجی تحرک یونی نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود یک جهش دمایی کوچک در هنگام پله‌های دمایی مشاهده می‌شود.

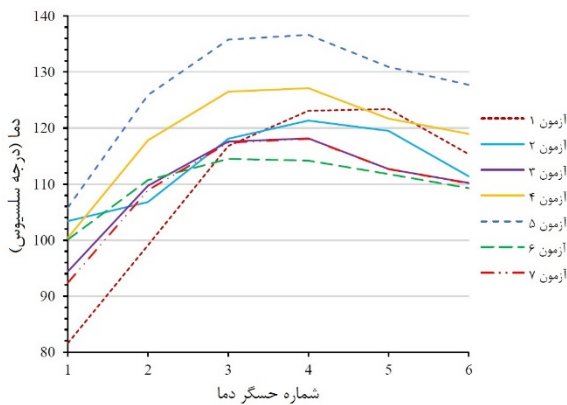


شکل (۸): تغییرات دما بر حسب زمان در سلول (آزمون شماره ۵)

همان‌طور که در شکل‌های ۶ تا ۸ نشان داده شده است، با افزایش دمای تنظیمی گرم‌کن سلول، تا حد کمی زمان رسیدن به دمای پایداری حرارتی افزایش می‌یابد. در مورد آزمون دمای ۱۴۰ درجه سلسیوس، با توجه به حداکثر دمای قابل تحمل تفنون، امکان تغییر شکل و سوختن تفنون وجود داشته و ممکن است در صورت استفاده طولانی مدت، تفنون دچار اعوجاج شود. در شکل ۹ (آزمون شماره ۶)، نمودار گرادیان دما در حالتی که گرم‌کن سلول، واجذب‌کننده و میکروپمپ دمنده روشن است و به تناوب میکروپمپ مکنده روشن و خاموش می‌شود (دمای تنظیمی واحد کنترل دما ۱۲۰ درجه سلسیوس)، نمایش داده شده است. در این حالت هوای گرم از واجذب‌کننده توسط میکروپمپ مکنده به داخل لوله رانش فرستاده می‌شود و دوباره توسط میکروپمپ دمنده هوا به خارج از سلول ارسال می‌شود. همان‌طور که مشخص است، با ایجاد حالت نوسانی رفت و برگشتی، دمای ورودی سلول از ۱۰۰ تا ۱۶۰ درجه سلسیوس، به صورت نوسانی افزایش و کاهش می‌یابد.

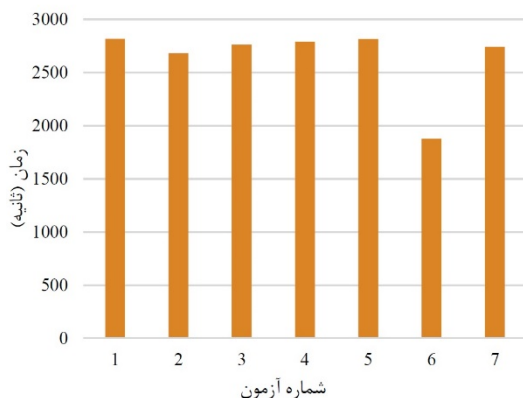


شکل (۹): تغییرات دما بر حسب زمان در سلول (آزمون شماره ۶)

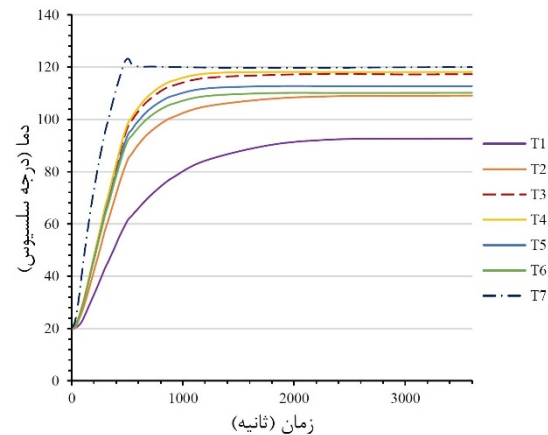


شکل (۱۲): گرادیان حرارتی در سلول طیف‌سنج تحرک یونی در آزمون‌های حرارتی

در مورد زمان گرمایش و رسیدن به پایداری حرارتی، آزمون‌های مختلف در شکل ۱۳ مقایسه شده‌اند. زمان رسیدن به پایداری حرارتی، بر اساس زمانی که حسگر شماره ۴ (با موقعیت مکانی میانه سلول آشکارساز) به یک دمای ثابت می‌رسد، بررسی شده است. مطابق شکل زیر، تفاوت چندانی در آزمون‌های شماره ۱ تا ۵ وجود ندارد، هر چند در آزمون شماره ۲ به نسبت آزمون شماره ۱ کاهش ناچیز زمان گرمایش مشاهده می‌شود. همچنین، با افزایش دمای هدف واحد کنترل دما، تا حدود کمی زمان رسیدن به پایداری حرارتی در آزمون‌های ۳ تا ۵ افزایش می‌یابد و در آزمون شماره ۷ با استفاده از پروفیل دمایی تغییر محسوسی نسبت به آزمون شماره ۳ مشاهده نمی‌شود. اما بیشترین کاهش زمان گرمایش مربوط به آزمون شماره ۶ با ۳۲ درصد کاهش است که با تغییر در برنامه کنترلی دستگاه قابل دستیابی است. این رو، روش مرتبط با آزمون شماره ۶ (ایجاد هوای نوسانی درون ناحیه رانش) گزینه مناسبی برای بهبود زمان گرمایش است.



شکل (۱۳): زمان گرمایش (رسیدن به پایداری حرارتی) برای آزمون‌های حرارتی



شکل (۱۱): تغییرات دما بر حسب زمان در سلول (آزمون شماره ۷)

همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، با مقایسه آن با حالت دمای تنظیمی نخستین ۱۲۰ درجه سلسیوس، تغییر محسوسی در گرادیان دمایی نهایی و زمان رسیدن به پایداری حرارتی مشاهده نمی‌شود. در این مورد، نبود تغییر محسوس نسبت به حالت اولیه، مربوط به زمان مورد نیاز جهت پایداری حرارتی می‌باشد و تغییرات پروفیل حرارتی نسبت به زمان چندان اثرگذار نیست.

در ادامه به بررسی و مقایسه نتایج حاصله از آزمون ۱ تا ۷ در ارتباط با گرادیان حرارتی پرداخته شده است. در شکل ۱۲ دمای ثبت‌شده حسگرهای دما در پایان هر آزمون نشان داده شده است. همان‌طور که در این تصویر مشاهده می‌شود، در آزمون شماره ۱ تا حدود زیادی اختلاف دمایی در نقاط مختلف سلول، حتی با گذشت حدود یک ساعت از شروع آزمون، وجود دارد که با روشن‌شدن و جذب‌کننده در طی آزمون شماره ۲ تا حدودی این گرادیان دمایی کاهش می‌یابد. در طی آزمون شماره ۳ با روشن‌شدن میکروپمپ دمنده، تفاوت چندانی در گرادیان دمایی نسبت به آزمون شماره ۲ مشاهده نمی‌شود و این روند در آزمون‌های ۴ و ۵ که به ترتیب دمای هدف ۱۳۰ و ۱۴۰ درجه سلسیوس می‌باشد، عیناً تکرار می‌شود. در آزمون شماره ۶، حالت نوسانی دمشی - مکشی، موجب کاهش قابل ملاحظه گرادیان دمایی در طول سلول گشته و در پایان، در آزمون شماره ۷، گرادیان دمایی مشابه آزمون شماره ۳ می‌باشد و تغییر چندانی مشاهده نمی‌شود. با توجه به شکل ۱۲ و اتلاف حرارتی از حلقه انتهایی سلول طیف‌سنج تحرک یونی، می‌توان دمای ناحیه انتهایی سلول را دمایی مابین حسگر شماره ۶ و حسگر شماره ۱ پیش‌بینی نمود.

۱، P توان، m جرم، c ظرفیت گرمایی ویژه، ΔT تغییرات دمایی، $\Delta T/\Delta t$ بازه زمانی و از این رو $\Delta T/\Delta t$ نرخ تغییرات دمایی است [۲۰].

$$P = mc \Delta T/\Delta t \quad (1)$$

با توجه به اینکه تفلون دارای ضریب انتقال حرارت رسانش بسیار پایینی است، در نتیجه مانع انتقال و یکنواختی حرارت در ناحیه رانش می‌شود، که این باعث ایجاد گرادیان دما در طول سلول در طی آزمون‌های ۱ تا ۷ مطابق شکل ۱۲ می‌شود. از این رو پیشنهاد می‌شود، حلقه‌های تفلونی با ماده‌ای با قابلیت هدایت حرارتی بالا و هدایت الکتریکی بسیار پایین (دی‌الکتریک) همچون سرامیک‌های اکسید فلزی پیشرفته جایگزین، و عملکرد آن بر روی کاهش زمان گرم شدن به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گیرد. مشخصات سرامیک‌های پیشنهادی برای جایگزینی با تفلون در جدول ۳ آمده است [۲۱ و ۲۲].

مطابق این جدول، با توجه به شکنندگی و تردی آلومینیم اکسید^{۲۴} و زیرکونیم دی‌اکسید^{۲۵}، همچنین ضریب انتقال حرارت بسیار بالای آلومینیم نیتريد^{۲۶} و بریلیم اکسید^{۲۷}، دو مورد آخری به عنوان جایگزین‌های مناسب از اولویت بالاتری برخوردار است. البته بایستی توجه داشت هزینه تامین این دو سرامیک مهندسی پیشرفته نسبت به دیگر سرامیک‌ها بالاتر بوده و بریلیم اکسید در حالت پودر، دارای ذرات سمی است [۲۳].

مطابق راهکار پیشین و با ضرورت به حداقل رساندن گرادیان حرارتی (آزمون ۱ تا ۷)، رسوب و لایه‌نشانی گرم‌کن مسطح با استفاده از فناوری لایه‌نشانی مواد بر روی صفحه حلقه سیلیکونی یا سرامیکی به همراه دیگر مدارات الکترونیک برای گرمایش حداکثری از دیگر اقداماتی است که قابلیت بررسی دارد [۲۴].

با توجه به اتلاف حرارتی در حلقه ورودی و انتهایی در طی تمامی آزمون‌ها، به منظور بهبود عایق کاری حرارتی و به حداقل رساندن انتقال حرارت به دیگر ابزارهای الکترونیکی نزدیک سلول طیف‌سنجی در سامانه آشکارساز، استفاده از عایق‌های حرارتی پیشرفته همچون آبروژل سیلیکایی نانومتخلخل^{۲۸} پیشنهاد می‌شود. پتوهای^{۲۹} حرارتی منعطف آبروژل (عایق گرم) (همان‌طور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است) در ضخامت‌هایی از ۳ تا ۲۰ میلی‌متر با عرض ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ میلی‌متر و درازای تا ۱۰ متر

در ادامه به منظور بهبود و بهینه‌سازی هر چه بیشتر ویژگی‌های حرارتی سلول طیف‌سنج تحرک یونی راهکارهایی ارائه شده است، اگرچه این راهکارها نیازمند بررسی تجربی و عددی بیش‌تر در تحقیقات پیش‌رو است.

همان‌طور که نمودار شماره ۱۲ نشان می‌دهد، حلقه‌های انتهایی و ورودی سلول همانند پخش‌کننده حرارتی^{۲۳} برای دفع گرما عمل می‌نمایند، پیشنهاد می‌شود تا بر روی دو حلقه ورودی و انتهایی، تا حد امکان عایق کاری حرارتی مناسب با استفاده از مواد عایق حرارتی پیشرفته انجام شود تا اتلاف حرارتی به حداقل ممکن برسد.

با توجه به نمودار گرادیان دمایی در طول سلول طیف‌سنج تحرک یونی (شکل شماره ۱۲)، پیشنهاد می‌شود تا بر روی حلقه‌های ورودی و انتهایی سلول، گرم‌کن سیمی سیلیکونی نسبت به قسمت‌های میانی، فشرده‌تر (با فاصله کمتر) پیچانده شود. این امر موجب می‌شود تا گرمای ورودی بیشتری به این ناحیه وارد و اتلاف حرارتی تا حدودی جبران شود.

مجرای هوای ورودی (شکل شماره ۲) جز ساختار سلول بوده و توسط گرم‌کن سیمی سیلیکونی گرم می‌شود. کاهش قطر مجرای هوای ورودی به ناحیه رانش سلول می‌تواند موجب افزایش سطح مقطع تماس حرارتی و از آنجا باعث افزایش دمای محفظه رانش سلول شود.

با توجه به کاهش دما در طول سلول و به ویژه در حلقه ورودی به خاطر اتلاف حرارتی در این ناحیه (آزمون شماره ۱)، گرمایش و تزریق هوا به وسیله یک گرم‌کن در مسیر ورودی هوا به داخل سلول، یکی دیگر از راهکارهایی خواهد بود که امکان کاهش گرادیان و زمان رسیدن به پایداری حرارتی را دارا است.

در راستای کاهش زمان گرمایش در طی تمام آزمون‌ها، می‌توان با استفاده از رابطه ۱ و با فرض اینکه انتقال گرما از گرم‌کن سلول تنها از طریق رسانش انجام شود، نسبت به کاهش جرم حلقه‌های تفلونی و فلزی در ناحیه رانش سلول اقدام نمود. مطابق فرمول زیر، در یک توان حرارتی ثابت با کاهش جرم، زمان لازم به منظور تغییرات حرارتی کاهش و سرعت تغییرات دمایی افزایش می‌یابد. برای رسیدن به این هدف، نیاز به ایجاد سوراخ‌های اضافی بر روی حلقه‌های تفلونی و فلزی تا جایی که استحکام مکانیکی آنها تحت تاثیر قرار نگیرد، می‌باشد. در رابطه

²⁷ Beryllium Oxide (BeO)

²⁸ Nanoporous Silica Aerogel

²⁹ Blankets

²³ Heat Sink

²⁴ Aluminium Oxide (Al₂O₃, Alumina)

²⁵ Zirconium Dioxide (ZrO₂, Zirconia)

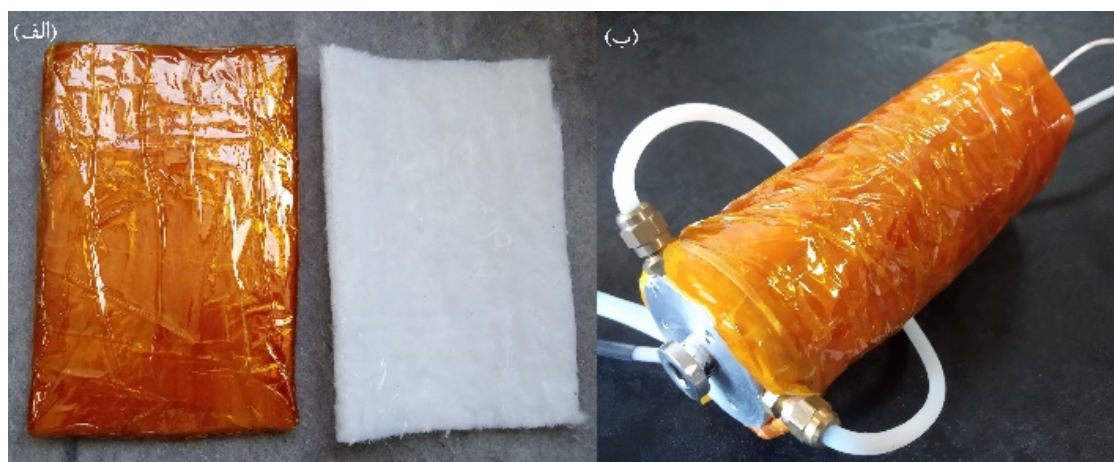
²⁶ Aluminium Nitride (AlN)

عمر بالا ۳۰ تا ۵۰ سال، قابلیت مونتاژ و ديمونتاژ چند باره برای تعمیرات یا بازرسی و همچنین نداشتن ریزش یا ترک به مرور زمان هستند. همچنین، برای روکش کردن و بسته بندی از چسب کپتون که عایق الکتریسیته و دما است نیز می توان استفاده نمود [۲۵].

تولید می شوند. بلنکتهای منعطف آبروژل نانو متخلخل، دارای ضریب رسانایی بسیار ناچیز در بازه دمایی ۲۰۰- الی ۶۵۰+ درجه سلسیوس از ۰.۰۱۴ تا ۰.۰۲ وات بر متر کلوین هستند. این عایقها دارای ویژگی هایی نظیر عایق صوت، ضدآب، ضدحریق، ضدخوردگی زیرسطح عایق، عملکرد عالی در دمای کاری ۲۰۰- الی ۶۵۰+ درجه سلسیوس، عملکرد فوق العاده با ضخامت کم، حجم و وزن ناچیز، زیست سازگار، قابل برش در هر شکلی، طول

جدول (۳): مقایسه ویژگی های حرارتی تفلون با دیگر سرامیک های اکسید فلزی

ماده- ویژگی	چگالی	انتقال حرارت	ظرفیت گرمایی ویژه	ثابت دی الکتریک
	(g/cc)	(W/m-k)	(J/g-k)	(GHz)
تفلون	۲.۳	۰.۲۵	۱.۵	۲.۷
آلومینیم اکسید، آلومینا (تراکم بالا)	۳.۹	۳۰-۳۵	۰.۸	۹.۸
زیرکونیم دی اکسید، زیرکونیا (تراکم بالا)	۵.۶	۱.۵-۳	۰.۴	۲۸
آلومینیم نیتريد	۳.۲	۱۰۰-۳۰۰	۰.۶	۸.۵
بریلیم اکسید	۳	۲۳۰-۳۳۰	۱	۶.۷



شکل (۱۴): (الف) پتوی حرارتی آبروژل سیلیکایی نانومتخلخل منعطف (عایق گرم) به همراه چسب کپتون، (ب) نحوه عایق کاری حرارتی بهینه سلول طیف سنج تحرک یونی

۴- نتیجه گیری

در این مقاله، گرادیان دما، زمان گرمایش و عوامل موثر بر آن در آزمون‌های مختلف بررسی شد. نتایج نشان داد درون ناحیه رانش سلول، گرادیان دمایی نسبتاً بالایی وجود داشته و همچنین زمان مورد نیاز برای گرم شدن محفظه رانش و آماده شدن دستگاه برای تشخیص مواد به طور نسبی بالا است.

با توجه به اندازه گیری‌های تجربی انجام پذیرفته در این مطالعه، دمای بدنه سلول با دمای هوای داخل اختلاف دارد و این در حالی است که در دیگر پژوهش‌های مرتبط با گرادیان حرارتی سلول، دمای بدنه سلول با استفاده از حسگرهای دما یا دوربین حرارتی فروسرخ بررسی شده است. از این رو، برای افزایش دقت داده‌ها در این تحقیق، تنها دمای هوای درون سلول مدنظر بوده و مطالعه شده است.

در دیگر پژوهش‌ها، تنها به بررسی عملکرد حرارتی سلول به صورت تنها پرداخته شده است. در حالی که در این مقاله تاثیر دیگر اجزاء مرتبط همچون واجذب کننده و جریان دمشی-مکشی میکروپمپ‌ها بر ویژگی‌های حرارتی نیز بررسی شده است.

با روشن شدن گرم کن واجذب کننده، مقداری از گرما به سلول منتقل شده و تا حدودی دمای هوای ورودی سلول افزایش و گرادیان حرارتی کم می‌شود. همچنین، با روشن شدن میکروپمپ دمنده، دمای ورودی سلول کاهش یافته ولی گرادیان دما در دیگر نقاط سلول تا حدودی ثابت می‌ماند.

نتایج آزمون‌های حرارتی نشان می‌دهد که استفاده از جریان هوای نوسانی درون سلول با استفاده از میکروپمپ‌های دمنده و مکنده، راه حل مناسبی برای رسیدن به گرادیان دمایی یکنواخت در کمترین زمان ممکن است. در این راستا نتایج تجربی و عملی، یک بهینه سازی ۳۲ درصدی را نشان می‌دهد.

در پلایان، به منظور بهینه سازی حرارتی می‌توان به راهکارهایی همچون: تغییر پیکربندی گرمایش و عایق کاری حرارتی، تزریق هوای پیش گرم شده، کاهش قطر مجرای ورودی به ناحیه رانش، کاهش جرم حلقه‌های تفلونی و فلزی، استفاده از حلقه‌های سرامیکی پیشرفته عایق الکتریسیته با هدایت حرارتی بالا، لایه نشانی حلقه فلزی و گرم کن به طور مستقیم بر روی صفحه حلقه سرامیکی و استفاده از عایق حرارتی آبروژل

سیلیکایی نانومتخلخل برای عایق کاری حرارتی اشاره نمود، که اطمینان از میزان تاثیر این موارد مستلزم بررسی‌های تجربی و عددی در پژوهش‌های آینده است.

تعارض منافع

هیچ تعارض منافی توسط نویسندگان بیان نشده است.

مراجع

- [1] J. Puton and J. Namieśnik, "Ion mobility spectrometry: Current status and application for chemical warfare agents detection," *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, vol. 85, pp. 10–20, Dec. 2016.
- [2] S. Armenta, F. A. Esteve-Turrillas, and M. Alcalà, "Analysis of hazardous chemicals by 'stand alone' drift tube ion mobility spectrometry: a review," *Analytical Methods*, vol. 12, no. 9, pp. 1163–1181, Mar. 2020.
- [3] R. Arevalo Jr, Z. Ni, and R. M. Danell, "Mass spectrometry and planetary exploration: A brief review and future projection," *J. Mass Spectrom.*, vol. 55, no. 1, 2020.
- [4] Saeed Hajialigol, Seyed Alireza Ghorashi, Amir Hossein Alinoori, Amir Torabpour, and Mehdi A'zimi, "Thermal Solid Sample Introduction-Fast Gas Chromatography-Low Flow Ion Mobility Spectrometry as a field screening detection system," *Journal of Chromatography A*, vol. 1268, pp. 123–129, Dec. 2012.
- [5] S. A. Ghorashi, A. H. Alinoori, and S. Hajialigol, "Signal-to-noise enhancement in TSSI-GC-IMS: Development of two dimensional sensor for detection of chemicals," *Microelectronics Journal*, vol. 45, no. 12, pp. 1634–1640, Dec. 2014.
- [6] Mahmoud Tabrizchi, Elaheh Maki Abadi, Razieh Parchami, and Elham Fadaei, "Dynamic Response of Ion Mobility Spectrometry," *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, vol. 33, no. 7, pp. 1148–1160, Jun. 2022.
- [7] C. Chen, M. Tabrizchi, and H. Li, "Ion gating in ion mobility spectrometry: Principles and advances," *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, vol. 133, p. 116100, Dec. 2020.

- [19] S. I. Merenbloom, T. G. Flick, and E. R. Williams, "How Hot are Your Ions in TWAVE Ion Mobility Spectrometry?," *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, vol. 23, no. 3, pp. 553–562, Dec. 2011.
- [20] N. Wang, A. Chen, W. Zhao, R. Zhu, and B. Duan, "An online temperature estimation for cylindrical lithium-ion batteries based on simplified distribution electrical-thermal model," *Journal of Energy Storage*, vol. 55, p. 105326, Nov. 2022.
- [21] S. N. Leung, "Thermally conductive polymer composites and nanocomposites: Processing-structure-property relationships," *Composites Part B: Engineering*, vol. 150, pp. 78–92, Oct. 2018.
- [22] X. C. Tong, Electronic packaging materials and their functions in thermal managements. In *Advanced Materials for Thermal Management of Electronic Packaging*, pp. 131-167, Springer, New York, NY, 2011.
- [23] J. Ujma, K. Giles, M. Morris, and P. E. Barran, "New high resolution ion mobility mass spectrometer capable of measurements of collision cross sections from 150 to 520 K," *Anal. Chem.*, vol. 88, no. 19, pp. 9469–9478, 2016.
- [24] Y. Zrodnikov, M. Y. Rajapakse, D. J. Peirano, A. A. Aksenov, N. J. Kenyon, and C. E. Davis, "High asymmetric longitudinal field ion mobility spectrometry device for low power mobile chemical separation and detection," *Anal. Chem.*, vol. 91, no. 9, pp. 5523–5529, 2019.
- [25] C.-Y. Zhu, H.-B. Xu, X.-P. Zhao, L. Gong, and Z.-Y. Li, "A Review on Heat Transfer in Nanoporous Silica Aerogel Insulation Materials and Its Modeling," *Energy Storage and Saving*, Jul. 2022.
- [8] H. Borsdorf, T. Mayer, M. Zarejousheghani, and G. A. Eiceman, "Recent Developments in Ion Mobility Spectrometry," *Applied Spectroscopy Reviews*, vol. 46, no. 6, pp. 472–521, Aug. 2011.
- [9] G. A. Eiceman, Z. Karpas, and H. H. H. Jr, *Ion Mobility Spectrometry, Third Edition*. CRC Press, 2013. Accessed: Nov. 07, 2023.
- [10] V. Gabelica and E. Marklund, "Fundamentals of ion mobility spectrometry," *Current Opinion in Chemical Biology*, vol. 42, pp. 51–59, Feb. 2018.
- [11] R. Fernandez-Maestre, "Note: Buffer gas temperature inhomogeneities and design of drift-tube ion mobility spectrometers: Warnings for real-world applications by non-specialists," *The Review of Scientific Instruments*, vol. 88, no. 9, p. 096104, Sep. 2017.
- [12] B. C. Hauck, W. F. Siems, C. S. Harden, V. M. McHugh, and H. H. Hill Jr, "High accuracy ion mobility spectrometry for instrument calibration," *Anal. Chem.*, vol. 90, no. 7, pp. 4578–4584, 2018.
- [13] B. C. Hauck, C. S. Harden, and V. M. McHugh, "Current status and need for standards in ion mobility spectrometry," *Int. J. Ion Mobil. Spectrom.*, vol. 21, no. 4, pp. 105–123, 2018.
- [14] B. C. Hauck, C. S. Harden, and V. M. McHugh, "Accurate evaluation of potential calibration standards for ion mobility spectrometry," *Anal. Chem.*, vol. 92, no. 8, pp. 6158–6165, 2020.
- [15] J. N. Dodds and E. S. Baker, "Ion mobility spectrometry: Fundamental concepts, instrumentation, applications, and the road ahead," *J. Am. Soc. Mass Spectrom.*, vol. 30, no. 11, pp. 2185–2195, 2019.
- [16] V. Ilbeigi and M. Tabrizchi, "Peak–peak repulsion in ion mobility spectrometry," *Anal. Chem.*, vol. 84, no. 8, pp. 3669–3675, 2012.
- [17] M. Najarro, M. E. Dávila Morris, M. E. Staymates, R. Fletcher, and G. Gillen, "Optimized thermal desorption for improved sensitivity in trace explosives detection by ion mobility spectrometry," *The Analyst*, vol. 137, no. 11, p. 2614, 2012.
- [18] M. Alikord, A. Mohammadi, M. Kamankesh, and N. Shariatifar, "Food safety and quality assessment: comprehensive review and recent trends in the applications of ion mobility spectrometry (IMS)," *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, vol. 62, no. 18, pp. 4833–4866, 2022.



COPYRIGHTS

© 2024 by the authors. Licensee Iranian Space Research Center of Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)