



مطالعه تجربی و تخمین ضرایب هدایت حرارتی و هدایت حرارتی تماسی توده کربن فعال دانه‌ای به صورت تابعی از چگالی کربن

مجید سیاوشی^{۱*}، پوریا محمدی^۲، محمدحسن خلیجی اسکویی^۳ و کسری قاسمی^۲

^۱ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

^۲ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

^۳ دکتری تخصصی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه وارویک، کاونتری، انگلستان

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۶/۲۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۰۹/۲۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۰۹

چکیده

کربن فعال نوعی از کربن است که به دلیل دارا بودن حفره‌های کوچک و کم‌حجم، سطح تماس بسیار زیادی را به منظور جذب سطحی و انجام واکنش‌های شیمیایی در دسترس قرار می‌دهد. کربن فعال به مرور زمان کاربردهای متنوعی در صنایع مختلف همچون فیلتراسیون، تصفیه آب، تبرید و غیره یافته است. شناخت خصوصیات حرارتی کربن فعال به منظور ارائه طراحی مناسب، به خصوص در سیکل‌های تبرید جذبی، اهمیت بسیاری دارد. در چنین طراحی‌هایی، مهم‌ترین پارامتر حرارتی توده کربن فعال ضریب هدایت حرارتی و مقاومت تماسی توده کربن فعال با دیواره‌ها است. در این مطالعه، طراحی آزمایش برای انجام مطالعه تجربی و تخمین پارامترهای توده کربن فعال دانه‌ای صورت گرفته است. بدین منظور، کربن فعال با چهار چگالی مختلف از دانه‌های کربن در داخل یک استوانه فولادی بسته‌بندی می‌شود و بارگذاری حرارتی روی استوانه انجام می‌گیرد. با اندازه‌گیری دمای گذرا در مرکز استوانه و استفاده از روش‌های معکوس حرارتی اقدام به تخمین ضریب هدایت حرارتی مؤثر توده کربن و مقاومت تماسی آن در تماس با دیواره فولادی می‌شود. نتایج آزمایش نشان می‌دهند که با افزایش چگالی کربن، هدایت گرمایی توده‌ای کربن و همچنین هدایت گرمایی تماسی با دیواره فولادی مجاور آن افزایش می‌یابد که روابطی برای آن‌ها استخراج شده است.

کلمات کلیدی: کربن فعال دانه‌ای؛ ضریب هدایت حرارتی؛ ضریب هدایت حرارتی تماسی؛ تخمین پارامتر؛ روش معکوس

Experimental Investigation and Estimation Of Thermal Conductivity and Contact Conductance of Granular Activated Carbon Packed Bed as a Function of Density

M. Siavashi^{1*}, P. Mohammadi², M. H. Khaliji Oskuei³, K. Ghasemi²

¹ Assoc. Prof., School of Mech. Eng., Iran University of Science and technology, Tehran, Iran.

² MSc., School of Mech. Eng., Iran University of Science and technology, Tehran, Iran.

³ Ph.D., Mech. Eng., School of Engineering, Warwick University, Coventry, England.

Abstract

Activated carbon (AC) is a kind of carbon that because of having tiny and low-volume cavities provides a good contact surface for adsorption and chemical reactions. AC has various applications in industries like filtration, water purification, refrigeration, agriculture, medicine industries and so on. Recognizing thermal properties of AC is valuable to provide an appropriate design of its applications especially in adsorption refrigeration cycles. In such designs the most important parameters of AC bulk is its thermal conductivity and thermal contact conductance resistance with wall. In this study, a test setup is prepared to conduct experimental investigation and estimate required parameters for granular AC. Granular AC with four different densities was packed in a steel closed cylinder and thermal loading was applied on its outside wall. By measuring transient temperature at the center of the cylinder and using inverse thermal methods, thermal conductivity and contact conductance with steel wall were estimated. Results show increase in thermal conductivity and contact conductance between carbon and steel wall as density increases.

Keywords: Granular Activated Carbon; Thermal Contact Conductance; Parameter Estimation; Inverse Method.

۱- مقدمه

کربن فعال^۱ شکل جامدی از کربن است که دارای تعداد قابل توجهی خلل و فرج روی سطح خود است؛ به طوری که این ویژگی، مساحت مؤثر سطح آن را در فرآیندهای شیمیایی و جذب سطحی افزایش می‌دهد. ویژگی‌های خاص این ماده باعث شده است که در کاربردهای صنعتی، پزشکی، محیط زیست، شیمی تجزیه، ذخیره‌سازی سوخت، کشاورزی، خالص‌سازی گازها و غیره مورد استفاده قرار گیرد [۱ و ۲]. کربن فعال از سوختن و تجزیه حرارتی مواد دارای ماهیت کربنی از قبیل، چوب، زغال‌سنگ، هسته یا پوسته‌ی بعضی میوه‌ها مانند گردو، نارگیل و استخوان به دست می‌آید. این دسته از مواد ممکن است، به صورت دانه‌ای یا پودری وجود داشته باشند. نوع دانه‌ای آن دارای سطح داخلی بالا و قطر دهانه‌ی حفره‌های کوچک است؛ در حالی که نوع پودری آن با قطر دهانه‌ی حفره‌های بزرگ‌تر، دارای سطح داخلی کوچک‌تری است. خواص جذب‌کنندگی کربن‌های فعال اصولاً مربوط به سطح آزاد زیاد، درجه‌ی بالای واکنش‌پذیری سطح، اندازه‌ی حفره‌های مناسب و سرعت جذب بالا است [۳]. با توجه به مزایای استفاده از سیستم‌های سرمایش جذبی و همچنین استفاده از کربن فعال به عنوان یک جاذب مناسب برای کاربردهای صنعتی، مطالعه و پژوهش روی خواص فیزیکی و شیمیایی این جاذب پرکاربرد، اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد [۴]؛ لذا پژوهش‌های متعددی در حوزه‌های شیمی، مکانیک و انرژی برای محاسبه یا تخمین خواص انواع کربن فعال، جهت بهینه‌سازی شرایط استفاده از این ماده صورت پذیرفته است. تخمین صحیح خواص گرمایی کربن فعال دانه‌ای از جمله ملزومات بهینه‌سازی سیکل جذب ژنراتور سردکن‌های جذبی و در نتیجه طراحی بهینه‌ی آن‌ها است. از این رو انگیزه‌ی کافی جهت مطالعه‌ی تجربی و نظری برای تخمین این خواص و افزایش راندمان سیستم‌هایی به وجود آمده است که فرآیند جذب سطحی را تجربه می‌کنند. از جمله روش‌های مورد استفاده در این زمینه، می‌توان به روش سنجش شار گرمایی محافظت شده، روش سیم داغ، روش تابش لیزری و روش‌های معکوس حرارتی اشاره کرد [۵-۸].

از نخستین مطالعات انجام شده در زمینه هدایت حرارتی در کربن فعال می‌توان به مطالعه کریتف و ترنر در سال ۱۹۹۵ [۹] اشاره کرد که هدایت حرارتی بستری از کربن فعال در شرایط خلأ و همچنین با گازهای هلیوم، نئون و آرگون را تا دمای 200°C مورد اندازه‌گیری قرار دادند. یک سال بعد در مطالعه‌ای دیگر کریتف و ثورف [۱۰]، انتقال گرما و افت فشار در بستر فشرده‌ی کربن فعال برای رینولدزهای پایین با استفاده از گازهای بی‌اثر را مورد بررسی قرار دادند. چیانگ و همکاران نیز [۱۱]، روش‌های متفاوتی را جهت محاسبه خصوصیات فیزیکی کربن فعال دانه‌ای از جمله قابلیت جذب^۲ و خصوصیات حفره‌های آن، مورد مقایسه و بررسی قرار دادند. گرت و بن [۱۲]، وابستگی فشار تراکمی به ضریب هدایت حرارتی مؤثر غیر همسانگرد در بسترهای دانه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعات تجربی آن‌ها مقادیر هدایت حرارتی غیرهمسانگرد را برای دو ماده‌ی مختلف به دست داد. در سال ۲۰۱۱ تیان و همکاران [۱۳]، انتقال گرما و جرم در کربن فعال یکپارچه^۴ را به میزبانی گرافیت طبیعی منبسط شده^۵ به وسیله‌ی اندازه‌گیری تراوایی و هدایت گرمایی آن مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه هدایت گرمایی با استفاده از روش منبع گرمایی پایا اندازه‌گیری شد. یک سال پس از آن، تیان و همکاران [۱۴]، هدایت گرمایی و تراوایی ترکیب متراکمی از جاذب‌های فیزیکی (کربن فعال) و شیمیایی (CaCl_2) را در میزبانی گرافیت طبیعی منبسط شده به عنوان ماتریس مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد، تراوایی و هدایت گرمایی برای جاذب‌های CaCl_2 و کربن فعال با نسبت گرافیت طبیعی منبسط شده و چگالی جاذب رابطه دارند. این در حالی است که در مطالعات ذکر شده کربن فعال دانه‌ای یا پودری به تنهایی از نظر پارامترهای حرارتی مورد بررسی قرار نگرفت.

ونگ و همکاران [۱۵] با مطالعه روی هدایت حرارتی و تراوایی کربن فعال یکپارچه به مقداری برای بیشینه هدایت گرمایی آن رسیدند. از سوی دیگر سو و همکاران [۱۶]، اثبات

² Granular Activated Carbon

³ Adsorption

⁴ Consolidated Activated Carbon

⁵ Expanded Natural Graphite

¹ Activated Carbon

گرمایی مؤثر در بستر ثابت محاسبه کردند. آن‌ها نشان دادند که هدایت گرمایی ذره‌ای با افزایش پوشش آلومینایی کاهش می‌یابد.

در مطالعاتی که در سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۰۶ توسط منارد و همکاران [۲۲]، [۲۳] صورت گرفت، هدایت حرارتی کربن فعال با هدف بهبود فرآیند جذب سطحی بررسی و اندازه‌گیری شد. آن‌ها در این مطالعه برای اندازه‌گیری هدایت حرارتی از اندازه‌گیری دما در نقاط مختلف یک ستون استوانه‌ای حاوی کربن فعال استفاده کردند. خلیجی اسکویی و تاماینوت تلو [۲۴] نیز از روش معکوس در مطالعه‌ی تجربی‌شان روی هدایت حرارتی تماسی و هدایت حرارتی کربن فعال استفاده کردند. کواگاکي و همکاران [۲۵]، مطالعه‌ای را برای افزایش هدایت حرارتی کربن فعال دانه‌ای با اضافه کردن پودر گرافیت به میزان ۲۰ تا ۳۰ درصد وزنی به آن و اندازه‌گیری هدایت حرارتی آن انجام دادند. در سال ۲۰۱۵ نیز ریورو پاچو و کریئف [۲۶]، با اندازه‌گیری مقاومت تماسی دیواره و هدایت گرمایی توده‌ی کربن فعال در دستگاهی مانند ژنراتور سیستم سرمایشی جذبی با استفاده از روش اندازه‌گیری شار حرارتی به مطالعه‌ی تجربی بر روی این ماده در دانه‌بندی‌های مختلف آن پرداختند؛ اما به دست آوردن یک هدایت حرارتی تماسی یکسان با دیواره در دو سمت گرم‌کن و سردکن نمونه که با هم متفاوت هستند، دقت مناسبی را از نتایج آزمایش به دست نداد.

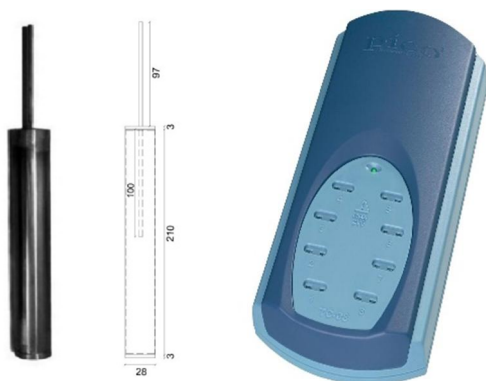
با مطالعه فعالیت‌های اخیر در زمینه اندازه‌گیری خواص حرارتی کربن فعال می‌توان مشاهده نمود که چگالی توده کربن از اهمیت بسزایی در خصوصیات جذب برخوردار است و همین‌طور می‌تواند خصوصیات حرارتی مؤثر توده کربن فعال را تحت تأثیر قرار دهد. اما با توجه به مرور صورت گرفته، تاکنون هیچ مطالعه‌ای در زمینه تأثیرات چگالی توده کربن و میزان فشردگی آن‌ها روی خواص حرارتی مؤثر آن انجام نشده است. این اطلاعات برای طراحی سیکل‌های تبرید جذبی که از کربن فعال دانه‌ای به عنوان ماده جاذب استفاده می‌کنند بسیار حائز اهمیت است. علاوه بر این کربن‌های فعال تولید شده در شرکت‌های مختلف بر اساس نوع و پایه آن‌ها می‌توانند خواص حرارتی متفاوتی را داشته باشند. از همین رو، هدف از این مطالعه انجام آزمایش به منظور تخمین خصوصیات حرارتی کربن فعال دانه‌ای، از جمله

کردند که هدایت حرارتی توده‌ی کربن فعال همراه با گرافیت، شش مرتبه بیشتر از کربن فعال بدون گرافیت طبیعی افزوده شده است. نتیجه‌ی دیگری که از این مطالعه حاصل شد نشان‌دهنده‌ی این بود که کربن با هدایت حرارتی بالا نه تنها قابلیت جذب سطحی خوب خود را حفظ می‌کند، بلکه اثر واجذب خوبی را نیز از خود نشان می‌دهد که این مسئله اهمیت بررسی مشخصات حرارتی کربن در دماهای بالا را دوچندان کرد؛ همچنین در بررسی عددی صورت گرفته توسط زاهد و همکاران که به صورت سه بعدی با استفاده از روش المان محدود به بررسی انتقال حرارت مؤثر کربن فعال پرداخته‌اند، روشی برای تخمین این پارامتر در بازه دمایی گسترده ارائه کردند [۱۷].

ژاو و همکاران [۱۸] با استفاده از یک مدل ریاضی و به کمک نرم افزار تجاری ANSYS Multiphysics معادلات مشتقات جزئی مربوط به بقای جرم، مومنتوم و انرژی را برای یک تانک ذخیره‌ی هیدروژن که از کربن فعال پر شده است حل کردند، اما اطلاعات قابل استفاده‌ی برای کاربرد در فرآیندهای تبرید جذبی کربن ارائه ندادند. در طی تحقیقی که اسکالنی و همکاران [۱۹] انجام دادند، کربن فعال دانه‌ای را در سردکن جذب سطحی در بازه‌ی دمایی زیر 100°C به کار بردند و عملکرد سیستم سرمایشی جذب سطحی را در حضور آن بررسی کردند. آن‌ها ضریب عملکرد و انرژی سرمایشی ویژه‌ی تجربی را برای این سیستم سرمایشی به دست آورده و استفاده از آن را برای مقاصد سرمایشی با منبع گرمایی اتلافی یا دما پایین مناسب دانستند؛ اما به طور خاص بر روی ویژگی‌های حرارتی کربن فعال در شرایط دمایی، چگالی و دانه‌بندی مختلف مطالعه‌ای صورت ندادند. در مطالعه‌ی دیگر، جین و همکاران [۲۰]، به بررسی و مقایسه‌ی هدایت حرارتی و تراوایی کربن‌های دانه‌ای، یکپارچه با چسب شیمیایی و یکپارچه باگرافیت طبیعی منبسط شده پرداختند که نتایج نشان داد؛ کربن فعال یکپارچه با چسب بیش‌ترین هدایت گرمایی را دارا بوده در حالی که کربن فعال دانه‌ای دارای تراوایی بیش‌تری نسبت به کربن فعال یکپارچه با چسب شیمیایی بود. چن و همکاران [۲۱]، هدایت حرارتی مؤثر بستر دانه‌ای تشکیل شده از کربن فعال پوشیده شده با آلومینا را با استفاده از روش سیم داغ به دست آوردند. همچنین هدایت گرمایی ذره‌ای را با استفاده از مدل هدایت

۲-۲- نحوه‌ی آماده‌سازی و انجام آزمایش

در این مطالعه از کربن فعال دانه‌ای 20°C که بر پایه پوست نارگیل می‌باشد و توسط شرکت شیمی پژوهان^۲ تولید گردیده استفاده شده است که در این مطالعه پس از اتمام فرآیند تهیه‌ی نگه‌دارنده‌های مناسب جهت آزمایش به بررسی اثر تغییر چگالی بر ضریب هدایت حرارتی و هدایت تماسی با دیواره نگه‌دارنده پرداخته می‌شود. بدیهی است که جهت بررسی اثر چگالی، می‌بایست سایر پارامترها از جمله اندازه دانه‌های کربن ثابت باقی بمانند. از این جهت برای بررسی تأثیر چگالی بر هدایت حرارتی، در نمونه‌ها تنها از یک نوع دانه‌بندی در طول آزمایش استفاده شد.



شکل ۱- طرح آزمایشگاهی شامل نگه‌دارنده‌ی نمونه (ابعاد آن به میلی‌متر است) و ذخیره‌ساز داده

ضریب هدایت حرارتی و ضریب هدایت حرارتی تماسی با دیواره فولادی به ازای چگالی‌های مختلف توده کربن است. بدین منظور آزمایشی طراحی گردیده که در آن بارگذاری حرارتی مناسب روی توده کربن فعال دانه‌ای صورت می‌گیرد و با اندازه‌گیری دمای گذرا در موقعیت مناسب و استفاده از روش‌های معکوس حرارتی اقدام به تخمین خصوصیات حرارتی مدنظر می‌شود. به منظور تخمین پارامترها در طی یک فرآیند با تکرارهای متوالی، تعامل مناسب بین دو نرم‌افزار MATLAB و ANSYS Multiphysics ایجاد گردیده، به طوری که حل مستقیم مسئله با استفاده از نرم افزار ANSYS Multiphysics انجام شده و حل معکوس و تخمین پارامترها با بهره‌گیری از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات در نرم افزار MATLAB انجام شده است.

۲- طرح و جزئیات آزمایش

۲-۱- طراحی نگه‌دارنده

برای اندازه‌گیری خواص حرارتی کربن فعال دانه‌ای، نگه‌دارنده‌ی بسته‌ی استوانه‌ای از جنس استیل ضد زنگ ۳۱۶ به عنوان محفظه‌ای برای نگه‌داری ماده در شرایط خاص گرمایی، طراحی و ساخته شد. این نگه‌دارنده دارای قابلیت تغییر نمونه‌ی درون خود را ندارد و به صورت دائمی نمونه در آن قرار می‌گیرد. از اتصال جوشی یک لوله با نسبت طول به قطر زیاد و دو عدد درپوش دایره‌ای بدنه‌ی اصلی استوانه‌ی نگه‌دارنده ساخته شد. یکی از درپوش‌ها دارای سوراخی مرکزی به قطر $3/175\text{ mm}$ است و یک لوله با قطر 3 mm و طول 210 mm از طریق آن سوراخ درون استوانه قرار گرفت به شکلی که نیمی از آن درون نگه‌دارنده و نیم دیگر خارج از استوانه قرار گرفت که از این لوله‌ی باریک برای ورود ترموکوپل به هسته‌ی توده‌ی کربن فعال استفاده شد. سایر ابعاد نگه‌دارنده در شکل ۱ مشخص شده است. در هر آزمایش سه عدد ترموکوپل نوع k برای اندازه‌گیری دمای مرکز توده کربن، جداره‌ی نگه‌دارنده و توده‌ی آب اطراف نگه‌دارنده در مکان مناسب خود مورد استفاده قرار گرفتند.

² www.shimipajooan.com

¹ Particle Swarm Optimization

جدول ۱- مقدار چگالی توده کربن موجود در هر نگه‌دارنده‌ی

نمونه				
شماره نمونه	۱	۲	۳	۴
چگالی (kg.m ⁻³)	۴۸۲/۰۸	۵۷۰/۱۱	۶۱۰/۹۶	۷۱۸/۰۰

این آزمایش بر پایه ایجاد بار حرارتی در مرز استوانه و بررسی پاسخ‌های حرارتی ناشی از تغییر شرایط مرزی روی دمای مرکز استوانه انجام گرفت که به یک محیط با درجه حرارت بالا نیاز داشت؛ بنابراین یک جوشاننده با حجم ۳۰ لیتر تهیه شد تا به کمک آن بتوان درجه حرارت آب را تا حدود دمایی کمی کمتر از دمای جوش افزایش داد. برای ایجاد شرط مرزی دما ثابت روی دیواره‌ی نمونه از یک جوشاننده‌ی آب استفاده شد که همراه با یک تنظیم کننده دما کار می‌کند. دستگاه تنظیم کننده دما که از طریق یک ترموکوپل قرار داده شده در آب جوشاننده دمای آن را دریافت می‌کرد، با بیش‌تر شدن دمای آب از مقدار مورد نظر جریان برق ورودی به جوشاننده را قطع و به همین شکل با کم‌تر شدن دمای آب از آن مقدار، جریان برق وصل می‌شود. به این شکل دمای آب در محدوده‌ای مشخص حول دمای مورد نظر قرار می‌گیرد که دامنه‌ی نوسان حول این دما حدود ۱ °C است.

۲-۳- تجهیزات اندازه‌گیری

ترموکوپل‌های استفاده شده از نوع K می‌باشند که دارای قابلیت کار در بازه‌ی دمایی از ۲۵۰°C- تا ۱۵۰۰°C هستند. داده‌بردار^۱ ۸ کاناله مدل TC-۰۸ ساخت شرکت پیکو^۲ که دارای ۸ کانال است، وظیفه‌ی برداشت دما از ترموکوپل‌ها و ثبت آن‌ها در کامپیوتر از طریق درگاه یواس‌بی^۳ را بر عهده دارد. این داده‌بردار قابلیت نمونه‌برداری تا ۱۰ نمونه در ثانیه را دارد که گستره‌ی دمایی ۲۷۰°C- تا ۱۸۲۰°C را شامل می‌شود. دقت اندازه‌گیری این داده‌بردار به همراه خطای ترموکوپل نوع k در حدود ۰/۰۲۵ °C است.

دانه‌بندی ۱۸×۳۰ به عنوان یک نمونه از انواع دانه‌بندی‌های کربن فعال در چگالی‌های مختلف در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۲). محدوده اندازه‌ی دانه‌های کربن فعال گرانول در قالب اندازه الک‌های استفاده شده برای آن به کار می‌رود که به صورت میلی‌متر و یا شبکه‌بندی آمریکایی بیان می‌شود. در واحد متریک اندازه‌ی بیان شده برای سایز کربن، در اصل فاصله بین سیم‌های الک است که با واحد میلی‌متر بیان می‌شود و در سیستم شبکه‌بندی آمریکایی اندازه‌های بیان شده، دلالت بر تعداد دهانه‌های الک در هر اینچ دارد. در واقع هرچه تعداد این دهانه‌ها در واحد اینچ بیشتر باشد، اندازه کربن کوچک‌تر می‌شود. کربن فعال دانه‌ای در چند مرحله داخل استوانه ریخته شد و تحت بارگذاری قرار گرفت به شکلی که کاملاً فشرده شد. این کار به تدریج انجام شد تا استوانه کاملاً با کربن پر شود که مقادیر چگالی برای هر نمونه در جدول ۱ مشخص شده است.

پس از اتمام فرآیند پر کردن نمونه‌ها در نگه‌دارنده‌ها و جوشکاری درپوش بالایی، باید از آب‌بند بودن نمونه‌ها و عدم نفوذ هرگونه رطوبت به درون نمونه‌ها و مرطوب شدن آن‌ها اطمینان حاصل گردد. در همین راستا پیش از آغاز آزمون با استفاده از یک کپسول گاز آرگون پرفشار و اعمال فشار آن بر محفظه درونی نمونه تا حدود ۵۰۰kpa و سپس قرار دادن نمونه در آب نسبت به بررسی عدم وجود حباب‌های خروجی از نگه‌دارنده اقدام گردید.



شکل ۲- کربن فعال گرانول مورد مطالعه با دانه‌بندی ۱۸×۳۰

¹ Data Logger

² Pico Technology Ltd.

³ USB port

۲-۴- خطای آزمایش

خطای آزمایش‌های انجام شده شامل، خطای ایجاد شده توسط ترموکوپل‌ها هنگام تبدیل گرما به جریان الکتریکی و داده‌برداری است که داده‌های از جنس ولتاژ را به دمای دیجیتالی تبدیل می‌کند. جمع خطای ترموکوپل و داده‌بردار برابر با $\pm 0.25^\circ\text{C}$ است.

۳- مدلسازی ریاضی و تخمین پارامتر به روش معکوس حرارتی

در مسئله حاضر، ضریب هدایت حرارتی مؤثر توده کربن (k) و همچنین مقاومت تماسی ($\frac{1}{h}$) آن با دیواره فولادی مجهول است. لازم به ذکر است که کربن به صورت ماده یکنواخت با k مؤثر در نظر گرفته شده است. به منظور تخمین این پارامترها از روش معکوس حرارتی استفاده می‌شود. بدین ترتیب که مقادیر مختلف برای پارامترهای مسئله تخمین زده شده و در طی حل مستقیم و شبیه‌سازی عددی، تأثیر آن‌ها بر تغییرات دما در محل قرارگیری ترموکوپل واقع در وسط استوانه بررسی می‌شود. پارامترهای مجهول در طی یک فرآیند معکوس به نحوی تخمین زده می‌شوند که کمترین اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و دماهای اندازه‌گیری شده وجود داشته باشد.

به منظور مدلسازی ریاضی و حل مستقیم مسئله لازم است تا معادله انرژی (هدایت حرارتی) برای هر دو بخش دیواره فولادی و کربن فعال حل شود که به صورت رابطه (۱) ارائه می‌شود:

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = k \nabla^2 T \quad (1)$$

به دلیل وجود مقاومت تماسی بین کربن و فولاد، در محل تماس آنها اختلاف دما وجود دارد که بوسیله رابطه (۲) محاسبه می‌گردد:

$$h = \frac{q_x}{(T_c - T_s)} \quad (2)$$

برای حل مستقیم مسئله، هندسه و شرایط مرزی مسئله برای دستیابی به مشخصات حرارتی کربن فعال دانه‌ای در نرم‌افزار ANSYS Multiphysics مدل‌سازی شد و داده‌های به دست آمده از حسگر قرار گرفته روی سطح استوانه به عنوان شرایط مرزی در آن بارگذاری شدند. علی‌رغم اینکه در این مطالعه قرار بر این شد که شرط مرزی دما ثابت روی سطح

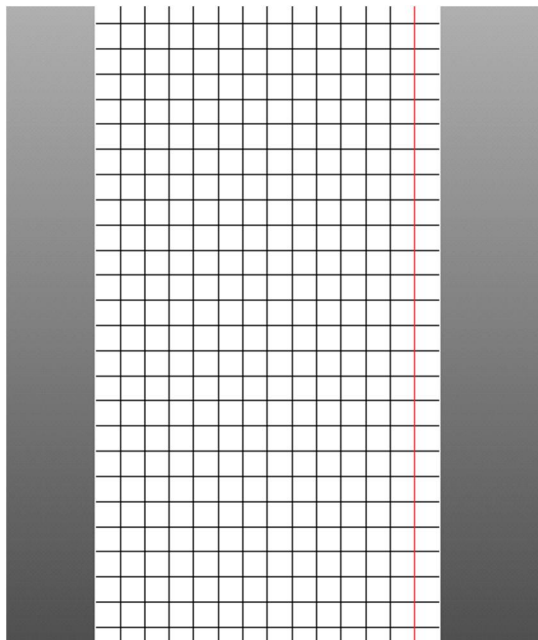
بیرونی استوانه‌ی نگه‌دارنده ایجاد شود، اما نمی‌توان از نوسانات حول دمای مورد نظر چشم‌پوشی کرد؛ لذا شبیه‌سازی به گونه‌ای طراحی و انجام شد که دمای مرز در هر گام زمانی با دمای اندازه‌گیری شده توسط ترموکوپل مستقر روی سطح خارجی دیواره‌ی نگه‌دارنده به‌روز رسانی شود که این موضوع خطاهای احتمالی ناشی از تثبیت دما در مرز نمونه را به حداقل رساند.

برای تخمین پارامترهای مسئله به روش معکوس حرارتی نیاز به پیاده‌سازی یک الگوریتم بهینه‌سازی است که با توجه به نتایج حل مستقیم، مقادیر مناسبی را برای پارامترهای مجهول تولید نموده و به عنوان ورودی به حل گر مستقیم وارد کند و این فرآیند را تا رسیدن به هدف تکرار نماید. به همین منظور از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات در نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است. به طوری که مقادیر اولیه برای پارامترهای مجهول توسط الگوریتم بهینه‌سازی در MATLAB تولید شده و با برقراری ارتباط بین این نرم‌افزار و ANSYS Multiphysics، این پارامترها وارد نرم‌افزار ANSYS Multiphysics می‌شوند. پس از آن حل مستقیم مسئله به‌وسیله این نرم‌افزار انجام شده و با استفاده از این نتایج تابع هدف در نرم‌افزار MATLAB محاسبه می‌گردد. در ادامه مقادیر جدیدی برای پارامترهای مجهول توسط الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهاد گردیده و این روند ادامه می‌یابد تا تابع هدف به مقدار بهینه خود برسد.

پس از مدل‌سازی هندسه‌ی بخش داخلی نگه‌دارنده شامل، توده‌ی استوانه‌ای کربن فعال به طول ۱۹۶ mm و به قطر ۲۵/۴ mm به همراه پوسته‌ی فولادی اطراف آن به ضخامت ۱ mm شبکه‌بندی تولید شد تا معادلات گسسته‌سازی شده‌ی حرارتی حاکم بر مسئله برای آن حل شود (شکل ۳ ملاحظه شود). لازم به ذکر است که شبکه بندی به صورت همگن مربعی صورت گرفته است. علاوه بر این از نوع المان Quad 8node 77 در نرم افزار ANSYS استفاده شده است. به دلیل وجود تقارن محوری در هندسه و شرایط مرزی، تنها نیمی از مقطع طولی آن مدل‌سازی شد که مسئله را به یک مسئله با هندسه‌ی دو بعدی متقارن محوری تبدیل کرد. دیواره‌ی فولادی نگه‌دارنده نیز در مقطع بریده شده لحاظ شد. مواد مورد استفاده در این مسئله با مشخصات جدول ۲ مدل‌سازی و حل مسئله به کار برده شدند.

جدول ۲- مشخصات قسمت‌های مختلف دستگاه

قسمت	جنس	ظرفیت گرمایی، C_p ، $(Jkg^{-1}K^{-1})$	هدایت گرمایی، k ، $(Wm^{-1}K^{-1})$	هدایت گرمایی تماسی، h ، $(Wm^{-2}K^{-1})$
نمونه	کربن فعال دانه‌ای	۱۶۰۰	k	h
پوسته	فولاد زنگ نزن ۳۱۶	۵۱۰	۱۵	h



شکل ۳- شبکه تولید شده برای مجموعه دیواره فولادی و نمونه کربن

هدایت گرمایی توده‌ی کربن (k) و هدایت تماسی بین نمونه و دیواره فولادی (h)، دو مشخصه‌ی ماده‌ی نمونه هستند که در فرآیند حل معکوس گرمایی به عنوان پارامترهای تأثیرگذار بر فرآیند هدایت گرمایی تعریف و تخمین زده می‌شوند. تابع هدف به صورت خطای میانگین مربعات^۱ (MSE) بین دمای اندازه‌گیری شده (T_{ex}) و دمای شبیه‌سازی شده (T_{sim}) تعریف می‌گردد. برنامه‌ی کامپیوتری با انجام تکرارهای متوالی و بررسی میزان اختلاف میان داده‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی کامپیوتری به کمک تابع MSE پارامترها را به پاسخ واقعی نزدیک می‌کند. MSE تابعی است که کیفیت یک فرآیند تخمین‌زنی را اندازه‌گیری می‌کند و معمولاً برای مسائلی که به مقایسه دو کمیت اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده می‌پردازد استفاده می‌شود.

با کمینه کردن تابع MSE می‌توان مقادیر پارامترهای مجهول را به نحوی تخمین زد که کمترین اختلاف بین دماهای آزمایش و شبیه‌سازی وجود داشته باشد. تابع MSE به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(T_{ex})_i - (T_{sim})_i]^2 \quad (3)$$

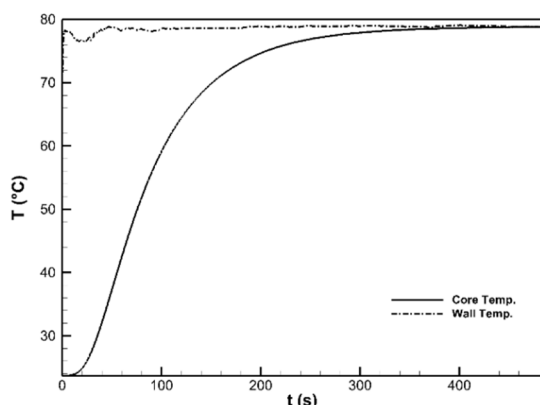
در رابطه (۳)، i شماره المان آرایه‌ها، n تعداد المان‌های آرایه‌ها، T_{ex} آرایه‌ی دمای هسته‌ی نمونه اندازه‌گیری شده به صورت تجربی و T_{sim} آرایه‌ی دمای هسته‌ی نمونه به دست آمده از شبیه‌سازی است. مقدار MSE همواره مثبت است و نزدیک بودن مقدار آن به عدد صفر، نشان‌دهنده‌ی این است که دو آرایه اختلاف زیادی در المان‌های متناظر خود ندارند و نمودارهای آن‌ها برحسب کمیت مشترک بین آن‌ها - که در این مسئله زمان است - به‌خوبی بر هم منطبق می‌شود.

چگونگی نزدیک شدن به جواب واقعی را یک الگوریتم بهینه‌ساز تعیین می‌کند. الگوریتم PSO برای بهینه‌سازی پارامترهای مذکور تا رسیدن به پاسخ نهایی مورد استفاده قرار گرفت. این الگوریتم یک روش محاسباتی است که با استفاده از تکرارهای متعدد یک پاسخ کاندیدا را با اندازه‌گیری کمیت آن بهبود می‌بخشد. اولین بار توسط کندی و ابره‌ارت [۲۷] در سال ۱۹۹۵ ابداع شد و برای کاربرد شبیه‌سازی رفتار اجتماعی به کار گرفته شد [۲۸]. الگوریتم PSO با استفاده از یک جمعیت از ذرات و حرکت دادن آن‌ها در فضای جست و جو به کمک اعمال فرمول‌های ریاضی ساده روی مکان و سرعت ذرات مسئله‌ی بهینه‌سازی را حل می‌کند. حرکت هر ذره تحت تأثیر بهترین مکان شناخته شده

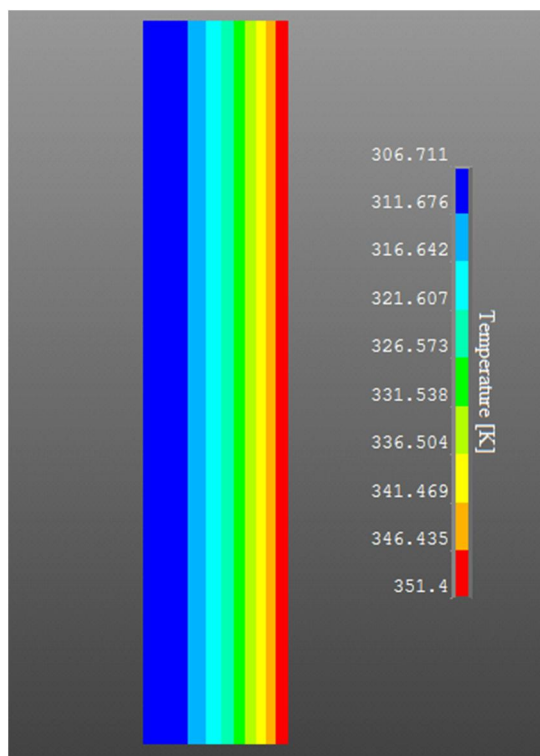
^۱ Mean Squared Error

موارد اضافه شدند که در نظر گرفتن آن‌ها برای این مسئله ضروری و لازم بود.

مقادیر نامشخص شامل هدایت گرمایی توده‌ی کربن فعال و ضریب هدایت گرمایی تماسی نمونه با دیواره‌ی مجاور است که در شروع با یک تخمین معقول تعیین شدند. این مقدار تخمینی بر اساس مقادیر متناظر برای مواد مشابه در شرایط مشابه تخمین زده شدند. به کمک الگوریتم بهینه‌ساز



شکل ۴- تغییر دمای مرکز استوانه و دیواره بر حسب زمان



شکل ۵- کانتور توزیع دمای نمونه پس از ۲۰۰ ثانیه

آن ذره قرار دارد. این در حالی است که به سمت بهترین مکان شناخته شده جهانی در فضای جست و جو نیز هدایت می‌شود. با استفاده از یک حدس اولیه برای هرکدام از پارامترهای تعریف شده که مقدار آن توسط کاربر تعیین می‌شود، فرآیند تکرار را تا رسیدن به نقطه‌ی اکسترمم تابع هدف ادامه می‌دهد.

۴- نتایج و بحث

با اعمال یک‌باره‌ی شرط مرزی دما ثابت روی دیواره‌ی نگه‌دارنده (با وارد کردن استوانه در یک مخزن آب داغ)، دمای هسته توده‌ی کربن فعال با گام زمانی ۰/۵ s داده‌برداری شد و تا رسیدن به دمای دیواره‌ی نگه‌دارنده و ایجاد تعادل دمایی در همه‌ی نقاط کربن فعال ادامه یافت. نمودار دما - زمان حاصل از این داده برداری روی سطح استوانه و همچنین در هسته آن برای یکی از نمونه‌ها در شکل ۴ آمده است.

پس از آن که نتایج آزمایشگاهی به دست آمد، شبیه‌سازی کامپیوتری و فرآیند تخمین پارامترها به کمک روش معکوس حرارتی برای نمونه مورد نظر بر اساس مقادیر شرایط مرزی و مشخصه‌های معین کربن فعال و دیواره انجام شد که در حین آزمایش در نظر گرفته شده بود. در ابتدا بررسی استقلال از شبکه صورت گرفت تا میزان خطا به حداقل مقدار خود برسد. در این راستا شبکه ۲۰۰×۴۰ مطابق جدول ۳ انتخاب گردید.

همان‌طور که از حل معادلات انتقال گرما در شبیه‌سازی مسئله انتظار می‌رفت، گرما به شکل افزایش دما از سمت دیواره به سمت هسته‌ی نمونه نفوذ کرد که در شکل ۵ نمونه‌ای از کانتور توزیع دما درون استوانه پس از گذشت ۲۰۰ ثانیه از شبیه‌سازی با استفاده از نرم افزار ANSYS Multiphysics ارائه شده است.

در واقع مشخصه‌های کربن فعال از جمله چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه و مشخصه‌های دیواره فولادی شامل، ضریب هدایت گرمایی، ظرفیت گرمایی ویژه و چگالی، برای گام‌های زمانی متوالی به عنوان مقادیر مشخص و معین در نظر گرفته شدند [۲۹]؛ همچنین دمای اولیه‌ی نمونه و دمای دیواره در هر گام زمانی نیز در حل معادله انتقال گرما به این

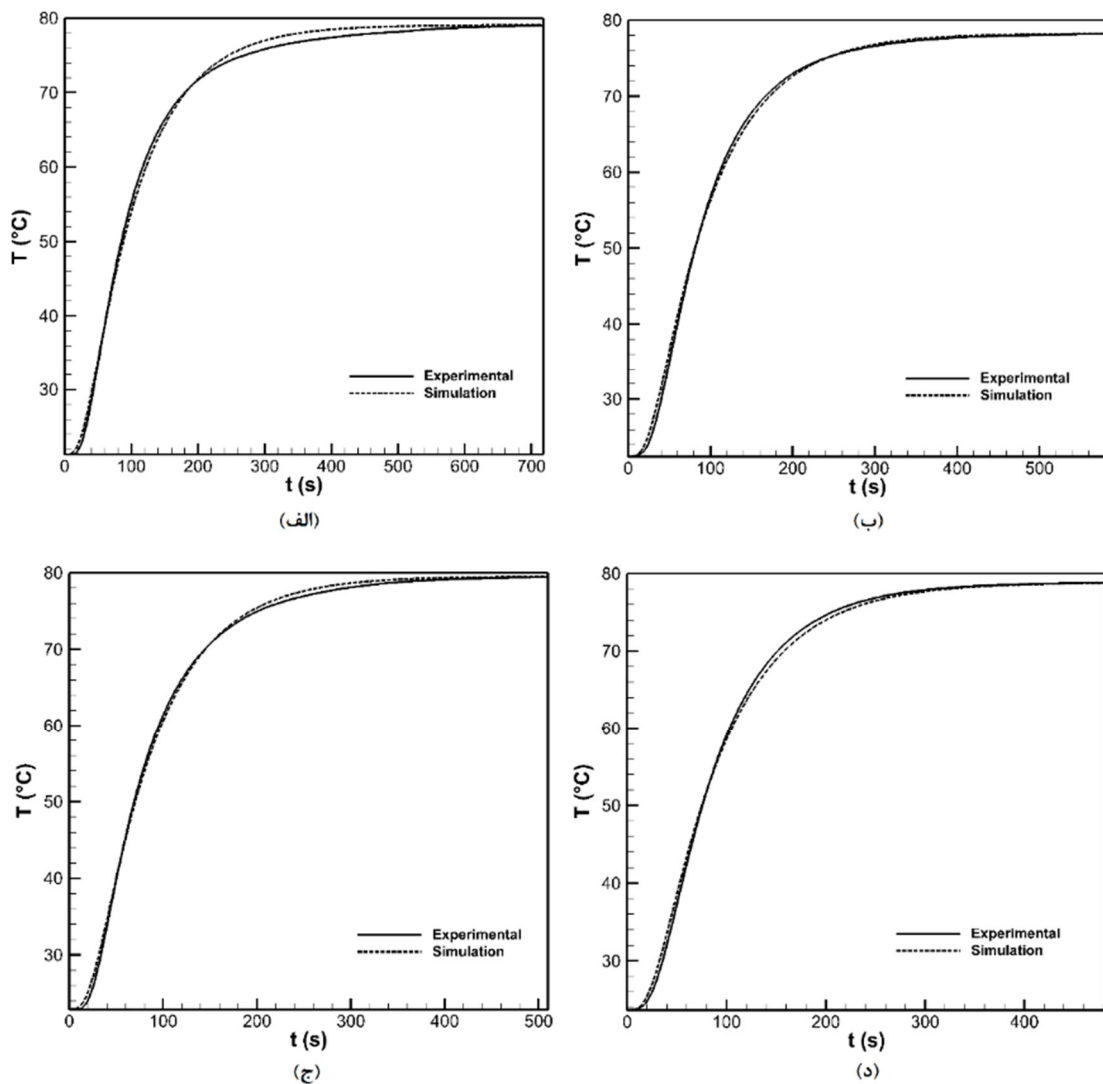
چهار نمونه می‌توان مشاهده نمود. همانطور که نشان داده شده است، نتایج تجربی و عددی مطابقت قابل قبولی با یکدیگر دارند؛ به طوریکه میزان MSE در تمامی نمونه‌ها در جدول ۴ نمایش داده شده است.

به کار گرفته شده خطا در طی تکرارهای متعدد به کمینه مقدار ممکن رسید که هر بار با توجه به روند تغییر خطا پارامترهای مورد نظر اصلاح شد.

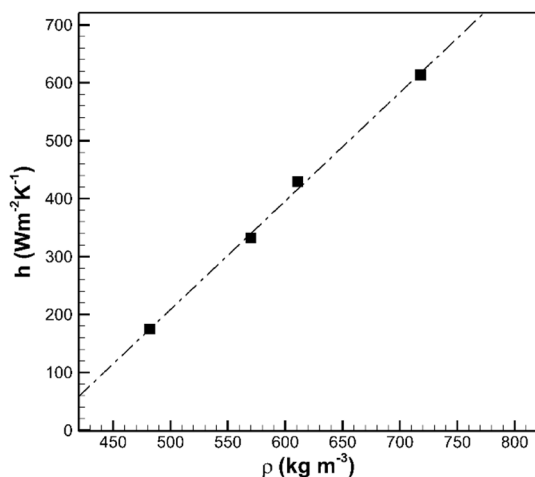
در شکل ۶ منحنی دما بر حسب زمان حاصل از شبیه‌سازی و دمای اندازه‌گیری شده در مرکز استوانه را برای

جدول ۳- بررسی استقلال از شبکه در نمونه شماره ۱ در زمان ۴۰۰ ثانیه

شبکه	۱۸۰×۲۰	۱۹۰×۳۰	۲۰۰×۴۰	۲۱۰×۵۰
دما (°C)	۷۸/۹۱	۷۸/۳	۷۷/۹۱	۷۷/۸۵۵



شکل ۶- نمودار مقایسه دمای به دست آمده از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی بر حسب زمان برای نمونه شماره الف) ۱، ب) ۲، ج) ۳ و د) ۴



شکل ۸- مقادیر هدایت تماسی دیواره برای چهار نمونه

بر همین اساس روابط زیر برای محاسبه مقادیر ضریب هدایت حرارتی مؤثر و ضریب مقاومت تماسی توده کربن با دیواره فولادی در مسئله مورد بررسی به صورت تابعی از چگالی توده کربن ارائه می‌گردد:

$$k = (5.91 \rho - 84.2) \times 10^{-4} \quad (۴)$$

$$h = 1.87\rho - 728 \quad (۵)$$

این روابط می‌توانند کارایی زیادی را برای طراحی سیکل‌های تبرید جذبی داشته باشند که از کربن فعال به عنوان ماده جاذب استفاده می‌کنند.

۵- جمع‌بندی

کربن فعال گرانول به عنوان یک جاذب سطحی کاربردهای وسیعی را در صنایع مختلف اعم از صنایع پتروشیمی، تبرید، تسویه آب، فیلتراسیون و غیره دارد. در برخی کاربردها کربن فعال به صورت فشرده در مخازن در بسته قرار گرفته و در معرض بارگذاری حرارتی واقع می‌شود. شناسایی خواص مؤثر توده کربن فعال شامل، ضریب هدایت حرارتی و ضریب هدایت تماسی آن با دیواره مخزن از اهمیت بسزایی برای تحلیل چنین سیستم‌هایی برخوردار است. چنین اطلاعاتی ارزش زیادی را برای انجام طراحی و تحلیل‌های سیستم‌های جذب سطحی دارند که کمتر در دسترس هستند. در اینجا کربن فعال دانه‌ای بر پایه پوست نارگیل با دانه‌بندی‌های مختلف به وسیله دستگاه تست کشش و تحت بارگذاری

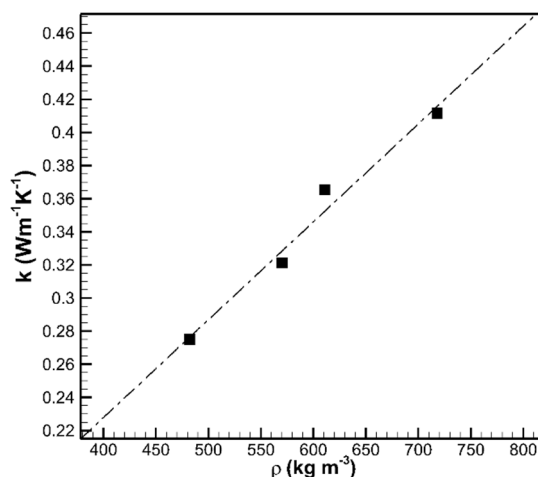
جدول ۴- مقادیر پارامترهای تخمین زده شده برای نمونه‌ها

شماره نمونه	هدایت گرمایی توده‌ی کربن ($Wm^{-1}K^{-1}$)	هدایت تماسی با دیواره ($Wm^{-2}K^{-1}$)	MSE
۱	۰/۲۷۵۱	۱۷۴/۷۳	۰/۶۲۲۷
۲	۰/۳۲۱۳	۳۳۱/۹۱	۰/۲۴۸۶
۳	۰/۳۶۵۴	۴۲۹/۷۱	۰/۲۴۸۷
۴	۰/۴۱۱۵	۶۱۳/۴۸	۰/۲۷۷۱

در جدول ۴ مقادیر پارامترهای تخمین زده شده برای چهار نمونه آزمایش به همراه مقادیر تابع MSE بعد از انجام روش معکوس بیان شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این دو منحنی به خوبی بر هم منطبق شده‌اند.

با توجه به تحلیل خطای صورت گرفته و تاثیر خطای اندازه‌گیری و پارامترهای ورودی روی نتایج نهایی، میزان خطای نتایج بدست آمده حداکثر ۱۰٪ تخمین زده می‌شود.

مقادیر به دست آمده برای ضریب هدایت حرارتی توده کربن و هدایت تماسی بین توده کربن و دیواره استوانه به صورت تابع از چگالی توده کربن در شکل ۷ و شکل ۸ به ترتیب ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشخص است، هدایت حرارتی توده کربن فعال دانه‌ای و همچنین ضریب هدایت تماسی با دیواره با افزایش چگالی تقریباً به صورت خطی افزایش می‌یابند.



شکل ۷- هدایت گرمایی توده‌ای نمونه برای چهار نمونه

تشکر و قدردانی نمایند. علاوه بر این آقایان مهندس آریا صولتیان و سینا شیری نیز در مراحل مختلف کمک شایانی به پیشبرد این پژوهش نمودند که شایسته تقدیر است.

۷- مراجع

- [1] Li Z, Wang L, Li Y, et al (2019) Carbon-based functional nanomaterials: Preparation, properties and applications. *Compos Sci Technol* 179: 10-40.
- [2] Movahedi N, Taherishargh M, Belova IV, et al (2018) Mechanical and Microstructural Characterization of an AZ91-Activated Carbon Syntactic Foam. *Mater Basel Switz* 12.
- [3] Saleh TA, Adio SO, Asif M, Dafalla H (2018) Statistical analysis of phenols adsorption on diethylenetriamine-modified activated carbon. *J Clean Prod* 182: 960-968.
- [4] Harrache Z, Abbas M, Aksil T, Trari M (2019) Thermodynamic and kinetics studies on adsorption of Indigo Carmine from aqueous solution by activated carbon. *Microchem J* 144: 180-189.
- [5] Vozár L (1996) A computer-controlled apparatus for thermal conductivity measurement by the transient hot wire method. *J Therm Anal* 46: 495-505.
- [6] Swift DL (1966) The thermal conductivity of spherical metal powders including the effect of an oxide coating. *Int J Heat Mass Transf* 9: 1061-1074.
- [7] Shulman ZP, Novichyonok LN, Belskaya EP, et al (1982) Thermal conductivity of metal-filled systems. *Int J Heat Mass Transf* 25: 643-651.
- [8] Okazaki M, Yamasaki T, Gotoh S, Toei R (1981) Effective thermal conductivity for granular beds of various binary mixtures. *J Chem Eng Jpn* 14: 183-189.
- [9] Critoph RE, Turner L (1995) Heat transfer in granular activated carbon beds in the presence of adsorbable gases. *Int J Heat Mass Transf* 38: 1577-1585.
- [10] Critoph RE, Thorpe R (1996) Momentum and heat transfer by forced convection in fixed beds of granular active carbon. *Appl Therm Eng* 16: 419-427.
- [11] Chiang Y-C, Chiang P-C, Chang E-E (1998) Comprehensive approach to determining the physical properties of granular activated carbons. *Chemosphere* 37: 237-247.
- [12] Garrett D, Ban H (2011) Compressive pressure dependent anisotropic effective thermal conductivity of granular beds. *Granul Matter* 13: 685.
- [13] Tian B, Wang L, Jin Z, Wang R (2011) Permeability and thermal conductivity of host

کنترل شده داخل مخزن استوانه‌ای فولادی فشرده شده و تحت بارگذاری حرارتی قرار می‌گیرد. با اندازه‌گیری دمای گذرا روی سطح استوانه و مرکز آن و استفاده از روش‌های هدایت حرارتی معکوس اقدام به تخمین مقادیر ضریب هدایت حرارتی توده کربن و ضریب هدایت تماسی آن با دیواره شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد، با افزایش چگالی توده کربن فعال دانه‌ای، میزان هدایت گرمایی آن افزایش می‌یابد؛ همچنین هدایت حرارتی تماسی آن با دیواره فولادی مجاور نیز افزایش می‌یابد که به بیان دیگر نشان دهنده‌ی کاهش مقاومت تماسی آن با دیواره در اثر افزایش چگالی است. در نهایت روابطی برای برآورد خواص مذکور به صورت تابعی از چگالی توده کربن ارائه گردید.

۶- فهرست علائم

C_p	ظرفیت گرمایی ویژه ($Wm^{-1}K^{-1}$)
h	هدایت گرمایی تماسی ($Wm^{-2}K^{-1}$)
i	شمارنده‌ی سری
k	هدایت گرمایی توده‌ای ($Wm^{-1}K^{-1}$)
n	تعداد المان‌های آرایه‌ی ($Wm^{-1}K^{-1}$)
T	دما ($^{\circ}C$)
t	زمان (s)
علائم یونانی	
ρ	چگالی ($kgm^{-1}s^{-1}$)
زیرنویس‌ها	
ex	تجربی
sim	شبیه‌سازی

۷- تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله علاقه‌مندند تا از شرکت شیمی پژوهان (تهران، چهار راه فاطمی، خیابان بیستون، کوچه الف دوم، پلاک ۳) و جناب آقای مهندس شهریار رحمانی به خاطر تأمین کربن فعال دانه‌ای و همچنین حمایت مالی از این پروژه

- activated carbon with core-shell structure. *Ind Eng Chem Res* 52: 3653-3657.
- [22] Menard D, Py X, Mazet N (2007) Activated carbon monolith of high thermal conductivity for adsorption processes improvement: Part B. Thermal regeneration. *Chem Eng Process Process Intensif* 46: 565-572.
- [23] Menard D, Py X, Mazet N (2005) Activated carbon monolith of high thermal conductivity for adsorption processes improvement: Part A: Adsorption step. *Chem Eng Process Process Intensif* 44: 1029-1038.
- [24] Oskouei MK, Tamainot-Telto Z (2014) Effect of packing density on thermal properties of granular activated carbon packed bed by using of inverse heat conduction method. *Therm Sci* 12: 1-12
- [25] Kuwagaki H, Meguro T, Tatami J, et al (2003) An improvement of thermal conduction of activated carbon by adding graphite. *J Mater Sci* 38: 3279-3284.
- [26] Pacho AMR, Critoph RE (2015) Wall contact thermal resistance and bulk thermal conductivity in activated carbon for adsorption generators. *Heat Transf Res* 46.
- [27] Kennedy J, Eberhart R (1995) Particle swarm optimization. In: *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*. 4: 1942-1948.
- [28] Kennedy J (1997) The particle swarm: Social adaptation of knowledge. In: *Proceedings of 1997 IEEE International Conference on Evolutionary Computation (ICEC '97)*.
- [29] Jones JC (1998) Indirect evidence of relatively high thermal conductivities in powdered activated carbons. *Fuel* 77: 1679-1681.
- compressed natural graphite for consolidated activated carbon adsorbent. *Front Energy* 5: 159-165.
- [14] Tian B, Jin ZQ, Wang LW, Wang RZ (2012) Permeability and thermal conductivity of compact chemical and physical adsorbents with expanded natural graphite as host matrix. *Int J Heat Mass Transf* 55: 4453-4459.
- [15] Wang LW, Tamainot-Telto Z, Thorpe R, et al (2011) Study of thermal conductivity, permeability, and adsorption performance of consolidated composite activated carbon adsorbent for refrigeration. *Renew Energy* 36: 2062-2066.
- [16] Zhan-Jun S, Neng-Ting P, Zhao W, et al (2012) Preparation and properties of activated carbons with high thermal conductivity. *Huaxue Gongcheng Chemical Eng* 14: 14-18.
- [17] Zahid M, Sharma R, Bhagat AR, et al (2019) Micro-structurally informed finite element analysis of carbon/carbon composites for effective thermal conductivity. *Compos Struct* 226: 111221.
- [18] Xiao J, Liu Y, Wang J, et al (2012) Finite element simulation of heat and mass transfer in activated carbon hydrogen storage tank. *Int J Heat Mass Transf* 55: 6864-6872.
- [19] Askalany AA, Saha BB, Ahmed MS, Ismail IM (2013) Adsorption cooling system employing granular activated carbon-R134a pair for renewable energy applications. *Int J Refrig* 36: 1037-1044.
- [20] Jin Z, Tian B, Wang L, Wang R (2013) Comparison on thermal conductivity and permeability of granular and consolidated activated carbon for refrigeration. *Chin J Chem Eng* 21: 676-682.
- [21] Chen F, Cai C, Cheng D, Zhan X (2013) Heat transfer characteristics of alumina membrane coated