

ظرفیت گرمای ویژه و ضریب هدایت حرارتی کود ورمی کمپوست

سید امیر ذکی^{۱*}، عزت اله عسکری اصلی زاده^۲، محمدحسین کیانمهر^۳، جواد خزائی^۴

۱. دانشجوی دوره دکتری، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه محقق اردبیلی

۲. دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه محقق اردبیلی

۳. استاد، گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران

۴. استاد، گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۰/۱ - بازنگری: ۱۳۹۴/۱۱/۱۰ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۷/۱۰)

چکیده

یکی از بهترین روش‌های بازیافت، تولید ورمی کمپوست از زباله شهری است. جداسازی بهینه کرم‌ها از مواد آلی بعد از اتمام فرآیند ورمی کمپوست‌سازی باعث افزایش نرخ تجزیه مواد زائد توسط کرم‌ها می‌شود. جهت طراحی و ساخت دستگاهی برای القاء حرارت به بستر کود ورمی کمپوست به صورت کنترل شده که هم باعث جداسازی کرم‌ها از بستر شده و هم آسیبی به کرم وارد نشود، داشتن پارامترهای حرارتی کود ورمی کمپوست ضروری می‌باشد. در این تحقیق ظرفیت گرمای ویژه و ضریب هدایت حرارتی به ترتیب با روش اختلاط و روش سیم داغ به دست آمد. آزمایشات با سطوح محتوای رطوبتی ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰٪ (w.b) در دماهای ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰°C انجام گرفت. مقدار ظرفیت گرمای ویژه از ۱/۶۵۳۷ تا ۳/۵۲۳۶ kJ/kg°C با افزایش دما و رطوبت افزایش یافت. مقدار ضریب هدایت حرارتی بین ۰/۱۰۵۴ تا ۰/۹۱۶۳ Wm⁻¹°C⁻¹ با افزایش دما و رطوبت به صورت خطی افزایش یافت.

واژه‌های کلیدی: روش سیم داغ، روش مخلوط، محتوای رطوبتی

مقدمه

با توجه به افزایش جمعیت، تولید انواع ضایعات کشاورزی و صنعتی در حال افزایش است. بنابراین، مسئله از بین بردن ضایعات آلی برای حفظ سلامت انسان و محیط زیست از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. کود دامی یکی از پسماندهایی است که امروزه به اهمیت آن پی برده‌اند. این کود همواره در باغ‌ها و مزارع استفاده می‌شود، اما معایب بسیاری دارد. حاوی تخم علف هرزی است که در بدن دام و طیور هضم نشده، نمی‌تواند آب را درون خود نگه‌داری کند و در ضمن بوی نامطبوع هم دارد. بنابراین کودهای دام و طیور بایستی فرآوری شوند. تولید ورمی کمپوست راهی است که می‌تواند این مشکلات را برطرف کند. ورمی کمپوست‌سازی به معنی استفاده از کرم به منظور تبدیل هر ماده زائد آلی به یک ماده بدون بو، دارای ساختار مناسب و غنی از مواد غذایی مورد نیاز گیاه می‌باشد (Fieldson., 1988). مدفوع کرم یا همان ورمی کمپوست عاری از تخم علف هرز می‌باشد، چون با گرمایی که در بدن کرم به وجود می‌آید تخم علف هرز از بین می‌رود و کود حاصل به خاطر شرایط اسفنجی که

دارد می‌تواند آب را در خود نگه دارد. ورمی کمپوست، کود آلی بیولوژیک است که در اثر عبور مداوم و آرام مواد آلی در حال پوسیدگی از دستگاه گوارش گونه‌هایی از کرم‌های خاکی و دفع این مواد از بدن کرم، حاصل می‌شود. فرآیند کمپوست‌سازی با استفاده از کرم‌های خاکی، برای تهیه ورمی کمپوست، به عنوان یک فناوری آسان و یک فرآیند حامی طبیعت برای به دست آوردن کودهای آلی از مواد زائد، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. جداسازی بهینه کرم‌ها از مواد آلی بعد از اتمام فرآیند ورمی کمپوست‌سازی می‌تواند باعث افزایش نرخ تجزیه مواد زائد توسط کرم‌ها شود. در واقع جداسازی موثر کرم‌های زنده، اجازه استفاده مجدد از آنها را داده و این عمل منجر به تولید گسترده ورمی کمپوست و کاهش هزینه تولید آن می‌گردد. وجود یک فناوری موثر برای جداسازی سریع کرم‌ها از ورمی کمپوست، امکان تسهیل فرآیند تولید کود کمپوست را فراهم می‌کند. روش توسعه یافته به منظور جدا کردن کرم‌ها از مواد آلی، همچنین می‌تواند در به‌کارگیری کرم‌ها در طرح‌های کشاورزی و یا حفظ اکوسیستم‌های حساس به کرم‌ها در برابر تهاجم آنها، استفاده گردد. تلفات کرم فاکتور بسیار مهمی در ورمی کمپوست‌سازی محسوب می‌شود. بنابراین از روشی برای جداسازی کرم‌ها باید استفاده کرد که دارای کمترین تلفات کرم

* نویسنده مسئول: seyedamir_zaki@yahoo.com

داشتند (Subramanian & Viswanathan, 2003). تأثیر رطوبت و دما بر ظرفیت گرمای ویژه چهار رقم پسته ایرانی با روش اختلاط بررسی شد. تحقیقات نشان داد که با افزایش دما از ۲۵- $^{\circ}\text{C}$ و ۷۰٪ و افزایش رطوبت از ۵-۴۵٪ (w.b)، ظرفیت گرمای ویژه پسته ایرانی روندی افزایشی دارد (Razavi & Taghizadeh, 2007). ظرفیت گرمای ویژه زرشک افزایش خطی از ۱/۹۶۵۳ تا $3/2811 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ را در دماهای ۵۰، ۶۰ و 70°C در رطوبت‌های ۱۹/۳، ۳۸/۵، ۵۵/۴ و ۷۷/۳ (w.b) نشان داد (Aghbashlo *et al.*, 2008). ظرفیت گرمای ویژه کود گاوی در رطوبت‌های ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۲٪ (w.b) و دماهای ۴۰، ۵۰، ۶۰ و 70°C افزایشی بین ۱/۹۹۲۵ تا $3/606 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ نشان داد (Amin-Nayyeri *et al.*, 2009).

دانشمندان زیادی، ضریب هدایت حرارتی مواد کشاورزی را با به‌کارگیری روش جریان حرارت گذرا، که توسط یک منبع حرارتی خطی تولید می‌شود، تعیین کردند. در این روش، اختلاف دمای اندازه‌گیری شده در فواصل مختلف زمانی، جهت تعیین ضریب هدایت حرارتی بکار می‌رود. با استفاده از همین روش، ضریب هدایت حرارتی قارچ بین $0/2084$ تا $Wm^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ (Shrivastava & Datta, 1999). ضریب هدایت حرارتی دانه زیره سبز، با افزایش دما از 50°C تا 50°C و افزایش رطوبت ۱/۸ تا ۲۰/۵ (d.b)، روند افزایشی نشان داد (Singh & Goswami, 2000). ضریب هدایت حرارتی دانه‌های خرد شده و پودر ارزن با افزایش رطوبت از ۱۰ تا ۳۰٪ (w.b)، افزایشی بین $0/026$ تا $0/223 \text{ Wm}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ را نشان داد (Subramanian & Viswanathan, 2003). ضریب هدایت حرارتی زرشک افزایش خطی را از $0/1324$ تا $Wm^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ در دماهای ۵۰، ۶۰ و 70°C در رطوبت‌های ۱۹/۳، ۳۸/۵، ۵۵/۴ و ۷۴/۳ (w.b) نشان داد (Aghbashlo *et al.*, 2008). ضریب هدایت حرارتی کود گاو در رطوبت‌های ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۲٪ (w.b) و دماهای ۴۰، ۵۰، ۶۰ و 70°C ، با روند افزایشی بین $0/0901$ تا $0/6814 \text{ Wm}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ گزارش شد (Amin-Nayyeri *et al.*, 2009).

هدف این تحقیق تعیین ظرفیت گرمای ویژه و ضریب هدایت حرارتی کود ورمی کمپوست و همچنین تعیین معادله‌ای جهت پیش‌بینی ظرفیت گرمای ویژه و ضریب هدایت حرارتی کود ورمی کمپوست به صورت تابعی از رطوبت و دما، می‌باشد.

مواد و روش‌ها

نحوه‌ی تهیه‌ی کود ورمی کمپوست

ورمی کمپوست تولیدی مورد استفاده در این مطالعه از واحد تولید

باشد. با توجه به بررسی‌های انجام گرفته روش‌های مکانیکی معمول به منظور جداسازی کرم از ورمی کمپوست دارای معایب عمده‌ای از جمله، عملکرد پایین، زحمت زیاد و صدمه زدن به کرم‌ها می‌باشند و مناسب ورمی کمپوست‌سازی تجاری نمی‌باشد (Beetz, 1999). از طرفی به نظر می‌رسد استفاده از حرارت کنترل شده و انتقال آن از قسمت زیرین توسط منبع حرارتی به بستر، باعث مهاجرت کلیه کرم‌ها به سطح دستگاه در مدت زمان کم و بدون آسیب رساندن به آنها می‌شود، بطوری‌که بعد از مدت زمان کم تجمع کرم‌های بالغ، نوزاد و البته لاروها را روی بستر سبب می‌گردد. همچنین یکی دیگر از امتیازات مهم روش حرارتی برای انتقال کرم‌ها، قابلیت ترکیب کردن این فرآیند با یک سیستم مکانیزه جداسازی (به عنوان مثال جداساز شانه‌ای انگشتی‌دار) و بنابراین مناسب بودن این روش در ورمی کمپوست‌سازی تجاری می‌باشد. جهت طراحی و ساخت دستگاهی برای انتقال حرارت به بستر کود ورمی کمپوست به صورت کنترل شده بطوری‌که باعث مهاجرت کرم‌ها از توده کود شده و آسیبی به کرم وارد نشود، داشتن پارامترهای حرارتی کود ورمی کمپوست از قبیل ظرفیت گرمای ویژه، ضریب هدایت حرارتی و ضریب انتشار حرارتی ضروری می‌باشد.

در مواد کشاورزی، به دلیل وابستگی شدید ظرفیت گرمای ویژه، ضریب هدایت حرارتی و ضریب پخش حرارتی به آب درون مواد، دما و محتوای رطوبتی اثر زیادی بر این سه پارامتر دارند. دانشمندان مختلف روش‌های گوناگونی را برای تعیین ظرفیت گرمای ویژه مواد کشاورزی و غذایی به کار گرفته‌اند. روش اختلاط یک روش معمول برای اندازه‌گیری ظرفیت گرمای ویژه مواد کشاورزی می‌باشد. در این روش، ظرفیت گرمای ویژه مواد جامد با سرد کردن ماده گرم در آب سرد و محاسبه گرمای از دست رفته توسط ماده گرم مورد آزمایش و گرمای جذب شده توسط آب سرد، بدست می‌آید (Mohsenin, 1980; Tabil, 1999). با استفاده از روش مخلوط، ظرفیت گرمای ویژه گندم بهاره در رنج دمایی $33/5^{\circ}\text{C}$ تا $21/8$ و رطوبت ۱ تا ۲۳٪ (d.b)، $1/054$ تا $2/521 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ (Njie *et al.*, 1998; Muir and Viravanichai, 1972). ظرفیت گرمای ویژه گل گاوزبان در رطوبت ۱/۲ تا ۳۰/۳٪ (w.b) در دماهای ۶، ۱۰ و 20°C تعیین شد (Yang 2002). ظرفیت گرمای ویژه زیره سبز با افزایش دما از 70°C تا 50°C و افزایش رطوبت از ۱/۸ تا ۲۰/۵ (d.b) روند افزایشی را نشان می‌دهد (Singh & Goswami, 2000). ظرفیت گرمای ویژه دانه‌های خرد شده و پودر ارزن افزایشی بین $1/33$ تا $2/40 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ در محدوده رطوبتی ۱۰ تا ۳۰٪ (w.b)

محققین زیادی قبلاً مورد آزمایش قرار گرفته است. تجهیزات مورد استفاده شامل یک کپسول (سیلندر) آلومینیمی برای نگهداری نمونه مورد آزمایش، با قطر ۱۵/۲ میلی‌متر و ارتفاع ۵۲/۶ میلی‌متر و ضخامت دیواره ۲/۱ میلی‌متر با یک درب رزوه-ای برای اطمینان از عدم خروج رطوبت نمونه و نفوذ آب به داخل کپسول در طی آزمایش. ترموکوپل نوع T با یک نمایشگر حرارتی، یک فلاسک ایزوله حرارتی به ظرفیت ۲۵۰ cm³ و یک آن Sreenarayanan & Chattopadhyay, 1986; Subramanian & Viswanathan, 2003; Chandra & Muir, 1971; Shrivastava & Datta; 1999.

برای تعیین ظرفیت گرمایی کالریمتر مقدار مشخصی آب مقطر با دمای بالا و مشخص (حداکثر ۷۰°C) در داخل کالریمتر که حاوی مقدار معینی آب مقطر با دمای پایین بود قرار داده شد. فرض شد که سیستم بی‌دررو است. ظرفیت گرمایی کالریمتر با معادله (۳) محاسبه شد (Razavi & Taghizadeh, 2007; Shrivastava & Datta, 1999).

$$H_f = \frac{M_{cw}C_w(T_e - T_{cw}) - M_{hw}C_w(T_{hw} - T_e)}{(T_{hw} - T_e)} \quad (\text{رابطه ۳})$$

برای تعیین ظرفیت گرمایی کپسول آلومینیمی مورد آزمایش، کپسول با دمای بالا در کالریمتر حاوی مقدار مشخصی آب مقطر در دمای پایین (دمای اتاق) قرار داده شد. فرض شد سیستم بی‌دررو می‌باشد. ظرفیت گرمایی کپسول از معادله (۴) به دست آمد: (Razavi & Taghizadeh, 2007; Shrivastava & Datta, 1999).

$$H_c = \frac{(H_f + M_{cw}C_w)(T_e - T_{cw})}{(T_c - T_e)} \quad (\text{رابطه ۴})$$

برای تعیین ظرفیت گرمای ویژه کود ورمی کمپوست، کپسول آلومینیمی با کود ورمی کمپوست پر شد و در آن دمای مورد آزمایش برای مدت یک ساعت قرار داده شد. سپس کپسول مورد آزمایش در داخل کالریمتر با مقدار مشخص آب مقطر با دمای پایین قرار داده شد تا به تعادل دمایی رسیده و دمای تعادل ثبت گردید. ظرفیت گرمای ویژه کود ورمی کمپوست با استفاده از معادله (۵) تعیین شد: (Razavi & Taghizadeh, 2007; Shrivastava & Datta, 1999).

$$C_p = \frac{(H_f + M_{cw}C_w)(T_e - T_{cw}) - H_c(T_m - T_e)}{M_m(T_m - T_e)} \times 4.1868 \quad (\text{رابطه ۵})$$

تعیین ضریب هدایت حرارتی

برای تعیین ضریب هدایت حرارتی کود ورمی کمپوست از روش منبع حرارتی خطی (روش سیم داغ) استفاده شد. ضریب هدایت حرارتی بر اساس رابطه بین دمای مرکز نمونه مورد آزمایش و

ورمی کمپوست واقع در دانشکده کشاورزی شهریار از استان تهران-شهرستان صفادشت عمل آوری شد و مورد آزمایش قرار گرفت.

نحوه اندازه گیری رطوبت

برای تعیین محتوای رطوبت اولیه، سه نمونه ۱۰۰ گرمی از کود طبق استاندارد ASAE S269.4 در داخل آن ساخت شرکت آبی‌آسا با دمای ۱۰۳±۳°C به مدت ۴۸ ساعت قرار داده شد. محتوای رطوبت طبق رابطه‌ی (۱) بر پایه‌ی تر سنجیده شد (ASAE Standards S269.4, 1998).

$$M_{w.b.} = \frac{W_w}{W_t} = \frac{W_w}{W_w + W_d} \quad (\text{رابطه ۱})$$

تهیه نمونه کود ورمی کمپوست با رطوبت مورد نظر

برای تهیه نمونه‌هایی با سطوح رطوبتی مورد نظر برای هر آزمایش، با آب پاش به کود آب مقطر اضافه گردید. مقدار آب اضافه شده از رابطه (۲) محاسبه شد. (Mohsenin, 1980).

$$m_w = \frac{m_i(M_{wf} - M_{wi})}{1 - M_{wf}} \quad (\text{رابطه ۲})$$

پس از اضافه نمودن آب مقطر، نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در کیسه‌های پلاستیکی در بسته، در یخچال با دمای پنج درجه سلسیوس نگهداری شدند تا رطوبت به طور یکنواخت در نمونه‌ها توزیع شود.

تئوری آزمایش

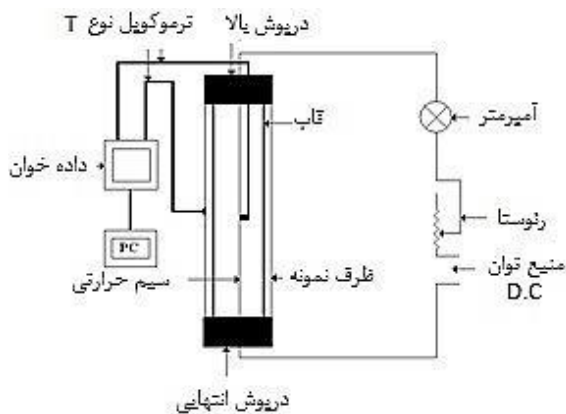
تعیین ظرفیت گرمایی ویژه

در این تحقیق، روش اختلاط (مخلوط) برای اندازه گیری ظرفیت گرمای ویژه کود ورمی کمپوست مورد استفاده قرار گرفت. فرضیات زیر در این آزمایش در نظر گرفته شد: (۱) اتلاف گرما در طی انتقال کپسول حاوی نمونه مورد آزمایش از ظرف آب داغ به کالریمتر ناچیز می‌باشد. (۲) در انتهای گرم کردن کپسول و نمونه، دمای نمونه مورد آزمایش و کپسول یکسان است. (۳) تبخیر انجام شده در کالریمتر در طی مدت زمان توازن حرارتی ناچیز است. (۴) تغییرات ظرفیت گرمایی کالریمتر و کپسول‌های مورد استفاده در رنج دمایی مورد آزمایش (۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰°C) معنی‌دار نیست (Sreenarayanan & Chattopadhyay, 1986; Subramanian & Viswanathan, 2003; Chandra & Muir, 1971; Shrivastava & Datta; 1999).

تجهیزات آزمایش

روش آزمایش اختلاط (مخلوط) جهت تعیین ظرفیت گرمایی مواد با تجهیزاتی که در ادامه توضیح داده خواهد شد، توسط

شده نوع T با قطر ۰/۸ میلی‌متر در فاصله تقریبی یک میلی‌متر از منبع حرارتی سیم داغ و در وسط سیم، به منظور اندازه‌گیری دمای مرکز نمونه به آن قرار داده شد. برای اندازه‌گیری دمای سطح بیرونی سیلندر برنجی حاوی نمونه، یک ترموکوپل نوع T به بدنه آن چسبانده شد. یک داده‌خوان چند کاناله (CHY502A, Taiwan) جهت ثبت داده‌های ترموکوپل‌ها استفاده شد. کود ورمی کمپوست در داخل سیلندر کاملاً پر شد و به منظور هم‌دما شدن سیلندر و نمونه هر دو در داخل یک آون با دمای پایه جهت انجام آزمایش، به مدت دو ساعت قرار داده شدند. به محض اینکه هر دو ترموکوپل داخل نمونه و خارج سیلندر حاوی نمونه یک دما را نشان دادند، جریان مستقیم در منبع حرارتی خطی برقرار شد. یک مولتی‌متر دیجیتال جهت اندازه‌گیری شدت جریان مدار به کار گرفته شد. توان مصرفی بین ۲/۵ تا ۶ Wm⁻¹ بود که افزایش دمایی بین ۵ تا ۱۴°C در نمونه مورد آزمایش منجر شد. تغییرات دمایی ترموکوپل هر سه ثانیه توسط داده‌خوان ثبت شد. دماهای ثبت شده توسط ترموکوپل در مقابل لگاریتم طبیعی زمان سپری شده در طول آزمایش رسم گردید. شیب (S) و ضریب تعیین (R²) به صورت متوالی برای هر آزمایش تعیین شد. شیب خط رسم شده بر نمودار با بالاترین ضریب تعیین، جهت محاسبه ضریب هدایت حرارتی استفاده شد (Murakami & Okos, 1988; Casada & Walto, 1989). شیب‌های خطوط رسم شده بر نمودارهای دما-لگاریتم زمان که ضریب تعیین کمتر از ۰/۹۹ داشتند در تعیین ضریب هدایت حرارتی استفاده نشد. ضریب هدایت حرارتی با استفاده از معادله (۱۲) تعیین شد. مقادیر ضریب هدایت حرارتی کود ورمی کمپوست در دماهای ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰°C و رطوبت‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰٪ اندازه‌گیری شد.



شکل ۱. طرحواره از تجهیزات استفاده شده جهت اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی کود ورمی کمپوست

زمان حرارت دهی تعیین شد. یک سیم لخت به عنوان منبع حرارتی استفاده شد. برای یک منبع حرارتی خطی طولی بی-نهایت (نسبت قطر سیم به طول بسیار کم)، همگن و ایزوتروپیک، افزایش دما در فاصله شعاعی r از منبع حرارت خطی با معادله (۶) نشان داده می‌شود (Casada & Walton, 1989)

$$T - T_o = -\left(\frac{Q}{4\pi k}\right) Ei\left(-\frac{r^2}{4\alpha t}\right) \quad \text{(رابطه ۶)}$$

معادله (۶) را می‌توان به صورت معادله (۷) بسط کرد:

$$T - T_o = \left(\frac{Q}{4\pi k}\right) \left\{ \ln \frac{4\alpha t}{r^2} - \gamma + \left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) - \frac{(-1)^2}{2.2!} \left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right)^2 + \frac{(-1)^n}{n.n!} \left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right)^n \right\}$$

برای مقادیر کوچک $r^2/(4\alpha t)$ ، همه جملات بعد از جمله دوم سمت راست معادله (۷) مقدار ناچیز بوده، بنابراین معادله (۷) به صورت معادله (۸) خلاصه می‌شود:

$$T - T_o = \left(\frac{Q}{4\pi k}\right) \left\{ \ln \left(\frac{4\alpha e^{-\gamma}}{r^2}\right) + \ln t \right\} \quad \text{(رابطه ۸)}$$

معادله (۸) به این معنی است که شیب نمودار (ΔT) در مقابل تابع نمایی زمان $(\ln(t))$ برابر است با:

$$S = Q/(4\pi k) \quad \text{(رابطه ۹)}$$

بنابراین ضریب هدایت حرارتی از معادله (۱۰) به دست

می‌آید:

$$k = \frac{Q\Delta \ln(t)}{4\pi S\Delta T} \quad \text{(رابطه ۱۰)}$$

یا

$$k = \frac{Q}{4\pi S} \quad \text{(رابطه ۱۱)}$$

و چون داریم: $Q=I^2R$ ، بنابراین معادله (۱۱) به صورت معادله (۱۲) در می‌آید:

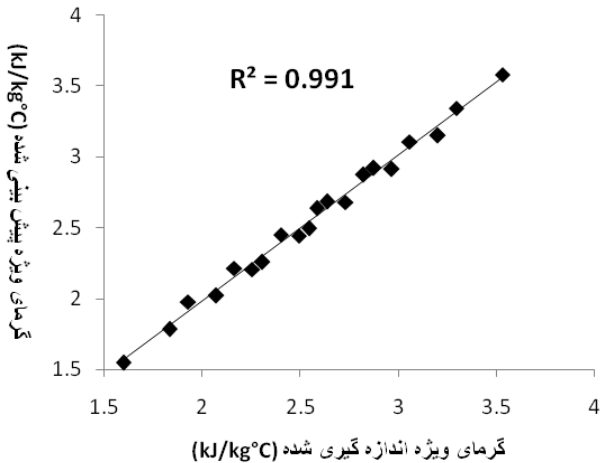
$$k = \frac{I^2 R}{4\pi S} \quad \text{(رابطه ۱۲)}$$

طرحواره از تجهیزات استفاده شده در آزمایش اندازه

گیری ضریب هدایت حرارتی با روش سیم داغ در شکل (۱) نشان داده شده است.

تجهیزات شامل یک سیلندر برنجی با ارتفاع ۲۴۰ میلی-متر، قطر داخلی ۵۸/۶ میلی‌متر و یک دریوش جداشدنی لاستیکی در بالا و یک درب لاستیکی ثابت در پایین سیلندر، می‌باشند. منبع حرارتی شامل یک سیم حرارتی کنستانتن با قطر ۰/۳۲ میلی‌متر و طول ۲۳۵ میلی‌متر (Ω ۱۱/۴۹) است که به یک منبع جریان مستقیم متصل می‌باشد. تنظیم میزان جریان به وسیله یک رئوستا انجام شد. یک ترموکوپل کالیبره

می‌باشد، بنابراین رویه نشان داده شده در شکل (۲) یک سطح تخت است. شکل (۳)، مقایسه بین ظرفیت گرمای ویژه محاسبه شده از طریق آزمایش با معادله بدست آمده جهت تخمین ظرفیت گرمای ویژه کود ورمی کمپوست در محدوده مورد آزمایش را نشان می‌دهد.



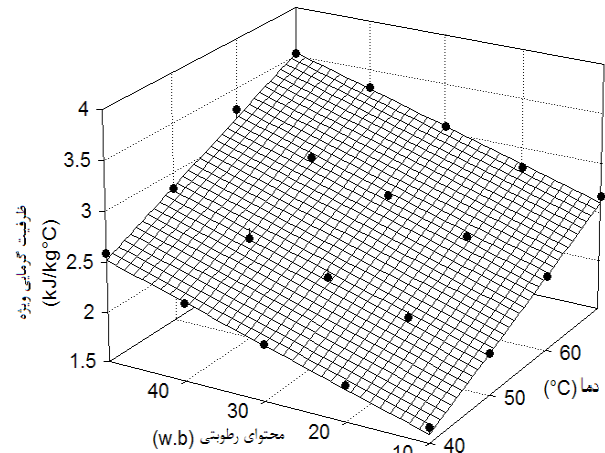
شکل ۳: ظرفیت گرمای ویژه اندازه گیری شده کود ورمی کمپوست در مقابل مقادیر تخمین زده شده با معادله (۱۳)

جدول (۱) نتیجه آنالیز واریانس هر یک از متغیرهای مستقل، رطوبت و دما، را بر روی ظرفیت گرمای ویژه کود ورمی کمپوست نشان می‌دهد. مقدار بالای F_{cal} در جدول آنالیز واریانس ثابت می‌کند که مدل خطی با $R^2=0.996$ جهت تخمین زدن ظرفیت گرمای ویژه کود ورمی کمپوست در محدوده مورد آزمایش، مناسب می‌باشد (Gomez, K. & A.A., 1984). مقایسه بین مقدار F_{cal} محتوای رطوبت و دما در جدول (۱) نشان می‌دهد که اثر رطوبت بر روی ظرفیت گرمای ویژه بیشتر از اثر دما می‌باشد.

نتایج

ظرفیت گرمایی ویژه

تغییرات ظرفیت گرمای ویژه کود ورمی کمپوست با محتوای رطوبتی و دما در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲. تاثیر دما و رطوبت بر ظرفیت گرمایی ویژه کود ورمی کمپوست

ظرفیت گرمای ویژه کود ورمی کمپوست از $1/6537$ تا $3/5236$ $\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$ در محدوده دما و رطوبت مورد آزمایش به دست آمد. همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، ظرفیت گرمای ویژه کود ورمی کمپوست با افزایش دما و افزایش محتوای رطوبتی، افزایش می‌یابد. با استفاده از آنالیز رگرسیون یک رابطه خطی بین متغیر وابسته، ظرفیت گرمای ویژه (C_p) و متغیرهای مستقل، محتوای رطوبتی (MC) و دما (T) به صورت معادله (۱۳) بدست آمد:

(رابطه ۱۳)

$$C = 0.0477 + 0.02361T + 0.03289MC \quad R^2 = 0.996$$

از آنجایی که معادله (۱۳) یک معادله خطی درجه یک

جدول ۱. جدول آنالیز واریانس (ANOVA) جهت بررسی تاثیر رطوبت و دما بر ظرفیت گرمای ویژه کود ورمی کمپوست

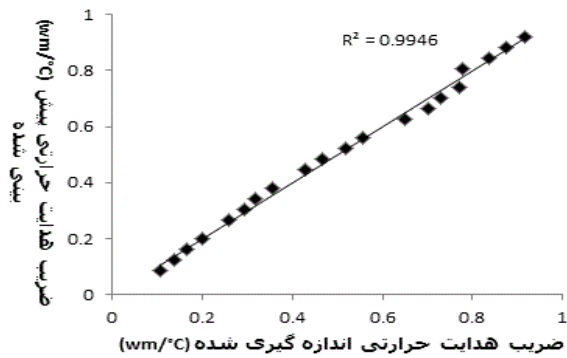
Probability	F_{cal} -value	میانگین مجموع مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	ظرفیت گرمای ویژه کود ورمی کمپوست
۰/۰۰۰۰	۱۲۴۶/۹۶۳***	۲/۴۶۸۰	۲	۴/۹۳۶۱	رگرسیون
۰/۰۰۰۰	۱۳۶۶/۵۰۲***	۲/۷۰۴۶	۱	۲/۷۰۴۶	رطوبت
۰/۰۰۰۰	۱۱۲۷/۴۲۵***	۲/۲۳۱۴	۱	۲/۲۳۱۴	دما
		۰/۰۰۱۹	۱۷	۰/۰۳۳۶	باقیمانده
			۱۹	۱/۳۴۹۲	جمع

*** بسیار معنی دار

۲۱/۸ و افزایش رطوبت از ۱-۲۳٪ (d.b) افزایش می‌یابد (Njie et al., 1998). همچنین محققین دریافتند که ظرفیت گرمای ویژه سبوس برنج، به صورت پودری، به طور خطی از ۱/۷۰۲ تا $2/189$ $\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$ در محدوده رطوبتی و دمایی ۳/۴-۱۸٪ و ۳۸-

افزایش ظرفیت گرمای ویژه کود ورمی کمپوست با افزایش محتوای رطوبتی و دما با یافته‌های محققین قبلی همخوانی دارد. ظرفیت گرمای ویژه گندم بهاره به صورت خطی از $1/054$ تا $2/521$ $\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$ با افزایش دما از $33/5$ تا 38 $^\circ\text{C}$

بدست آمده برای ضریب هدایت حرارتی کود ورمی کمپوست، یک سطح تخت می‌باشد. شکل (۵)، مقایسه بین ضریب هدایت حرارتی محاسبه شده از طریق آزمایش با معادله به‌دست آمده جهت تخمین ضریب هدایت حرارتی کود ورمی کمپوست را نشان می‌دهد.



شکل ۵: ضریب هدایت حرارتی اندازه گیری شده کود ورمی کمپوست در مقابل مقادیر تخمین زده شده با معادله (۱۴)

جدول آنالیز واریانس (جدول ۲) به روشنی نشان می‌دهد که تأثیر محتوای رطوبتی بر ضریب هدایت حرارتی کود ورمی کمپوست، در محدوده آزمایش شده، بیشتر از اثر افزایش دما می‌باشد. بزرگی ضریب محتوای رطوبتی نسبت به ضریب دما در معادله (۱۴) نیز این موضوع را تصدیق می‌نماید.

با توجه به جدول (۲)، ضرایب معادله (۱۴) در سطح ۰/۰۰۱ معنی دار بوده و همچنین مقدار ضریب تعیین ۰/۹۹۴ نشان دهنده این است که معادله خطی (۱۴)، تخمین مناسبی از ضریب هدایت حرارتی کود ورمی کمپوست در محدوده آزمایش را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، ضریب هدایت حرارتی با افزایش رطوبت و دما به صورت خطی افزایش می‌یابد. این روند تغییرات با یافته‌های محققین قبلی تطابق دارد. ضریب هدایت حرارتی گندم بهاره در محدوده رطوبتی ۴/۴-۲۵/۵٪ و تغییرات دمایی بین ۶ تا ۲۰°C، از ۰/۱۳۸۲ تا ۰/۱۶۷ W/m°C تغییر کرد (Njie et al., 1998). ضریب هدایت حرارتی قارچ در محدوده رطوبتی و دمایی ۱۰/۲۴-۶۸-۸۹٪ (w.b) و ۴۰-۷۰°C، از ۰/۲۰۸۴ تا ۰/۵۳۰۹ W/m°C افزایش یافت (Shrivastava & Datta, 1999). ضریب هدایت حرارتی زیره سبز افزایشی بین ۰/۰۴۶ تا ۰/۲۲۳ W/m°C با افزایش رطوبت از ۱/۸ تا ۲۰/۵٪ (d.b) و افزایش دما از ۲۰- تا ۵۰°C داشت (Singh & Goswami, 2000). ضریب هدایت حرارتی کود گاو بین ۰/۰۹۰۱ تا ۰/۶۸۱۴ W/m°C به صورت افزایشی و خطی گزارش شد (Amin-Nayyeri et al., 2009).

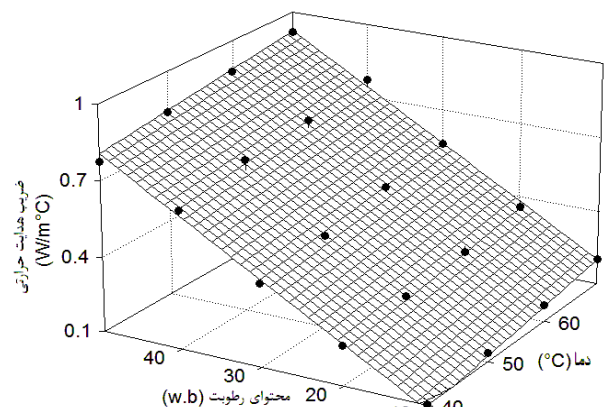
۶۳°C افزایش می‌یابد (Narain et al., 1978). همینطور، تحقیقات بر روی قارچ نشان داد که ظرفیت گرمای ویژه آن به صورت خطی از ۱/۷۱۵۸ تا ۳/۹۴۹۸ kJ/kg°C با افزایش دما و رطوبت بین ۴۰-۷۰°C و ۱۰/۲۴-۸۹/۶۸٪ (w.b) افزایش پیدا می‌کند (Shrivastava & Datta, 1999). در تحقیق دیگری بر روی زیره سبز، هر دو متغیر رطوبت و دما تأثیر معنی‌داری بر روی ظرفیت گرمای ویژه زیره سبز نشان دادند، به طوری که با افزایش دما از ۵۰-۷۰°C و افزایش رطوبت از ۱/۸-۲۰/۵٪ (d.b) ظرفیت گرمای ویژه به صورت چند جمله‌ای درجه دو افزایش یافت (Singh & Goswami, 2000). همچنین محققین نشان دادند که ظرفیت گرمای ویژه پسته ایرانی به رطوبت و دما وابسته است و با افزایش دما از ۲۵-۷۰°C و افزایش رطوبت از ۵-۴۵٪ (w.b)، ظرفیت گرمای ویژه پسته ایرانی از ۰/۴۱۹ تا ۲/۹۳۰ kJ/kg°C افزایش می‌یابد (Razavi & Taghizadeh, 2007). همچنین تحقیق بر روی کود گاو، میزان ظرفیت گرمای ویژه آن در محدوده دمایی و رطوبتی ۴۰-۷۰°C و ۲۰-۸۲٪ (w.b) بین ۱/۹۹۲۵ تا ۳/۶۰۶ kJ/kg°C به صورت خطی تغییر داشت (Amin-Nayyeri et al., 2009).

ضریب هدایت حرارتی

ضریب هدایت حرارتی کود ورمی کمپوست از ۰/۱۰۵۴ تا ۰/۹۱۶۳ W/m°C در محدوده آزمایش نسبت به تغییرات دما و رطوبت تغییر نشان داد. ضریب هدایت حرارتی با افزایش دما و رطوبت نمونه کود ورمی کمپوست مورد آزمایش به صورت خطی افزایش داشت. با استفاده از آنالیز رگرسیونی، یک رابطه خطی (معادله ۱۴) بین ضریب هدایت حرارتی (K) کود ورمی کمپوست، محتوای رطوبتی (MC) و دما (T) بدست آمد.

$$K = -0.2503 + 0.00384T + 0.01806MC \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

$$R^2 = 0.994$$



شکل ۴: تأثیر دما و رطوبت بر ضریب هدایت حرارتی کود ورمی کمپوست

سطح نشان داده شده در شکل (۴) بر طبق مدل خطی

جدول ۲. جدول آنالیز واریانس (ANOVA) جهت بررسی تاثیر رطوبت و دما بر ضریب هدایت حرارتی کود ورمی کمپوست

Probability	F _{cal} -value	میانگین مجموع مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	ضریب هدایت حرارتی
۰/۰۰۰۰	۱۵۷۲/۲۲۹***	۰/۶۷۰۹	۲	۱/۳۴۱۹	رگرسیون
۰/۰۰۰۰	۳۰۵۷/۹۴۵***	۱/۳۰۵۰	۱	۱/۳۰۵۰	رطوبت
۰/۰۰۰۰	۸۶/۵۱۱۸***	۰/۰۳۶۹۲	۱	۰/۰۳۶۹۲	دما
		۰/۰۰۰۴	۱۷	۰/۰۰۷۲	باقیمانده
			۱۹	۱/۳۴۹۲	جمع

*** بسیار معنی دار

نتیجه گیری

ملاحظه‌ای به متغیرهای دما و رطوبت در محدوده آزمایش وابستگی نشان داد. یک معادله خطی، با ضرایب مناسب، جهت تخمین مقدار ضریب هدایت حرارتی در محدوده آزمایش، با استفاده از آنالیز رگرسیونی بدست آمد. مقدار ضریب هدایت حرارتی کود ورمی کمپوست از ۰/۱۰۵۴ تا ۰/۹۱۶۳ W/m°C با افزایش رطوبت و دما در محدوده آزمایش، به صورت خطی افزایش داشت. تأثیر افزایش رطوبت، بر افزایش ضریب هدایت حرارتی کود ورمی کمپوست، در محدوده مورد آزمایش، بیشتر از اثر افزایش دما است.

ظرفیت گرمای ویژه کود ورمی کمپوست با افزایش رطوبت در محدوده ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰٪ و دما در محدوده ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰°C از ۱/۶۵۳۷ تا ۳/۵۲۳۶ kJ/kg°C افزایش داشت. نتایج نشان داد که یک رابطه خطی قابل قبولی بین دما و رطوبت با ظرفیت گرمای ویژه در محدوده مورد آزمایش وجود دارد. همچنین تاثیر تغییرات رطوبت بر ظرفیت گرمای ویژه بیشتر از دما می‌باشد.

ضریب هدایت حرارتی کود ورمی کمپوست به طور قابل

نمادها

T_e = دمای تعادل آب سرد (°C)	$M_{w.b}$ = رطوبت کود بر مبنای تر (/.)
H_c = ظرفیت گرمایی کپسول (cal/°C)	W_w = جرم آب موجود در کود (gr)
T_c = دمای کپسول (°C)	W_t = جرم کل کود (gr)
C_p = ظرفیت گرمای ویژه کود ورمی کمپوست (kJ/kg°C)	W_d = جرم ماده خشک موجود در کود (gr)
M_m = جرم نمونه کود ورمی کمپوست داخل کپسول آلومینیمی (g)	m_w = جرم آب اضافه شده (gr)
T_m = دمای نمونه کود ورمی کمپوست داخل کپسول آلومینیمی (°C)	m_i = جرم اولیه کود تر (gr)
Q = میزان گرمای تولید از منبع حرارت خطی (W)	M_{wi} = رطوبت اولیه کود بر مبنای تر (/.)
K = ضریب هدایت حرارتی (W/m°C)	M_{wf} = رطوبت نهایی بر مبنای تر (/.)
A = ضریب انتشار حرارتی (m ² /s)	H_f = ظرفیت گرمایی فلاسک (cal/°C)
T = زمان (s)	M_{cw} = جرم آب سرد (g)
$Ei(-x)$ = انتگرال تابع نمایی	M_{hw} = جرم آب داغ (g)
I = شدت جریان الکتریکی عبوری از سیم حرارتی (A)	C_w = ظرفیت گرمایی آب (1 cal/g°C)
R = مقاومت واحد طول سیم (Ωm ⁻¹)	T_{cw} = دمای آب سرد (°C)
γ = ثابت اولر	T_{hw} = دمای آب داغ (°C)

REFERENCES

- Aghbashlo M., Kianmehr M.H., & Hassan-Beygi S.R. (2008). Specific heat and thermal conductivity of berberis fruit (*Berberis vulgaris*). *American Journal of Agricultural Biological Science*, 3(1), 330-336.
- Amin-Nayyeri, M., Kianmehr, M.H., Arabhosseini, A & Hasan-Beigi, S.R. (2009). Thermal properties of dairy cattle manure. *International agro physics*, 23, 359-366.
- ASAE Standards S269.4 Cubes. (1998). Pellets and crumbles-definitions and methods for determining density, durability and moisture content ASAE DEC96: *Standard S358.2 Moisture Measurement-forages*. St. Joseph, MI: ASAE
- Beetz, A. (june1999). Worms for composting (Vermicomposting). Retrieved August 5, 2015,

- ATTRA Livestock technical notes., from <https://attra.ncat.org/publication/summaries>.
- Casada, M.E. & Walton, L.R. (1989). Thermal conductivity of baled burley tobacco. *Trans. ASAE*, 32 (2), 977-982.
- Chandra, S. & W.E. Muir. (1971). Thermal conductivity of spring wheat at low temperatures. *Trans. ASAE*, 14 (4), 644-648.
- Fieldson, R.S. (1988). The economic viability of earthworm culture on animal wastes, in Earthworms in waste and environmental management. C. Edwards, & Neuhauser, F., Editors. *The Hague*, 145-156.
- Gomez, K. & Gomez, A.A. (1984). *Statistical procedures for agricultural research*. (2th ed.). New York: Wiley Inc.
- Mohsenin, N.N. (1980). *Thermal properties of foods and agricultural materials*. New York, NY: Gordon and Breach, Science Publishers, Inc.
- Muir, W. E. & Viravanichai, E. (1972). Specific heat of wheat. *Journal of Agricultural. Engineering. Research*, 17, 338-342.
- Murakami, E.G. & Okos, M.R. (1988). Measurement and prediction of thermal properties of foods. *In food properties and computer-aided engineering of food processing systems*. R.P. Singh and A.G. Medina(Eds.), Kluwer Academic Publishers Boston, 1989, pp. 3-48.
- Narain, M., S.S.C. Bose, M. Jha & Dwivedi, V.K. (1978). Physic thermal properties of Rice Bran. *Journal of Food Science and Technology*, 15 (1), 18-19.
- Njie D.N., Rumsey T.R., & Singh R.P. (1998). Thermal properties of cassava, yam and plantain. *Journal of Food Engineering*, 37, 63-76.
- Razavi, S.M.A. & Taghizadeh, M. (2007). The specific heat of pistachio nuts as affected by moisture content, temperature, and variety. *Journal of Food Engineering*, 79, 158-167.
- Shrivastava, M. & Datta, A.K. (1999). Determination of specific heat and thermal conductivity of mushrooms (*Pleurotus Florida*). *Journal of Food Engineering*, 39, 255-260.
- Singh, K.K. & Goswami, T.K. (2000). Thermal properties of Cumin Seed. *Journal of Food Engineering*, 45,181-187.
- Sreenarayanan, V.V. & Chattopadhyay, P.K. (1986). Specific heat of Rice Bran. *Agricultural of Wastes*, 16, 217-224.
- Subramanian, s. and R. Viswanathan. (2003). Thermal properties of minor millet grains and flours. *Biosystems Engineering*, 84 (3), 289-296.
- Tabil L.G. (1999). Specific heat of agricultural and food materials. Res. Report, *Department of Agricultural and Bioresource Engineering*, University of Saskatchewan, Canada.
- Van der Held, E.F.M. & Van Drunen, F.G. (1949). A method of measuring the thermal conductivity of liquids. *Physica*, 15, 865-881.
- Yang W., Sokhansanj S., Tang J., & Winter P. (2002). Determination of thermal conductivity, specific heat and thermal diffusivity of borage seeds. *Biosystem Engineering*, 82(2), 169-176.