

## تعیین ضریب انتشار حرارت کود گاوی با استفاده از حل یک بعدی معادله فوریه

محمد امین نیری<sup>۱</sup>، محمد حسین کیانمهر\*<sup>۲</sup>، اکبر عرب محمدحسینی<sup>۳</sup> و سید رضا حسن بیگی بیدگلی<sup>۴</sup>

۱، ۲، ۳، ۴، دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، دانشیار و استادیارن پردیس ابوریحان - دانشگاه تهران.

(تاریخ دریافت: ۸۷/۴/۱۰ - تاریخ تصویب: ۱۳۸۸/۵/۵)

## چکیده

رطوبت زیاد کود گاوی تازه، محیطی را برای رشد عوامل بیماری‌زا فراهم می‌آورد و باعث آلودگی محیط زیست می‌شود. یکی از راه‌های کاهش این آلودگی‌ها، کاهش رطوبت کود می‌باشد همچنین کود خشک برای استفاده در زمین‌های کشاورزی و بستر دام کاربرد دارد. از جمله مواردی که برای ساخت یک خشک‌کن مناسب باید در نظر گرفت خواص حرارتی ماده شامل گرمای ویژه، ضریب هدایت حرارت و ضریب انتشار حرارت می‌باشد. در این تحقیق ضریب انتشار حرارت کود گاوی با استفاده از حل یک بعدی معادله فوریه به دست آمد. آزمایش‌ها در رطوبت‌های ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۲٪ و در دماهای ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰°C انجام گرفت. مقدار ضریب انتشار حرارت ( $\alpha$ ) از  $0.10^{-7} \times 0.904$  تا  $2.11 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  به دست آمد. مقدار ضریب انتشار حرارت با افزایش دما به صورت خطی افزایش یافت. در دمای ثابت، با افزایش رطوبت از ۲۰ به ۴۰٪ مقدار  $\alpha$  افزایش یافته و در رطوبت‌های بالاتر از ۴۰٪ روند کاهشی نشان داد. یک مدل چند جمله‌ای با ضریب تعیین  $R^2=0.99$  برای تخمین ضریب انتشار حرارت، برحسب رطوبت و دما به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: کود گاوی، ضریب انتشار حرارت، معادله فوریه، رگرسیون

## مقدمه

دوغایی<sup>۲</sup>، نیمه جامد<sup>۳</sup> و جامد<sup>۴</sup> تقسیم‌بندی می‌کنند که مبنای این تقسیم‌بندی، مواد خشک، ویسکوزیته و خصوصیات رئولوژیکی کود می‌باشد. علاوه بر مواد مذکور تأثیر عواملی همچون رژیم غذایی دام، نوع و مقدار مواد مورد استفاده در بستر دام، میزان پسماند آب و غذای مورد استفاده برای دام نیز در این تقسیم‌بندی در نظر گرفته می‌شود (Landry et al., 2004). از لحاظ وزنی، تولید کود دامی جامد سه برابر کود مایع است و تقریباً نیمی از ازت، تمام فسفر و ۴۰ درصد پتاس موجود در کود دامی در قسمت جامد آن متمرکز می‌باشد. کود جامد دامی در واقع قسمتی از علوفه مورد مصرف حیوان می‌باشد که تحت تاثیر شیره دستگاه گوارش قرار گرفته ولی به صورت قابل جذب برای حیوان در نیامده است.

از آنجایی که کود گاوی بعد از تولید دارای بذور علف‌های هرز و مواد جامدی است که نیازمند زمان برای تجزیه می‌باشند؛ لذا بلافاصله قابل مصرف نمی‌باشد و لازم است در سیلویی نگهداری شوند. متأسفانه در ایران کود تازه به ندرت در سیلو مطابق با اصول علمی نگهداری می‌شود و در اکثر موارد در محل دامداری‌ها دپو می‌شود. کود تازه دارای رطوبت بیشتر از ۸۰٪ است و به همین دلیل کود دپو شده محل مناسبی برای

در کشور ما، برای تامین مواد لبنی و گوشت مورد نیاز شهرها، دامپروری‌های بزرگ صنعتی در حاشیه شهرها گسترش یافته‌اند. دامپروری‌های صنعتی با تولید و تجمع کود در محیط دامپروری‌ها سلامت و بهداشت محیط زیست را به مخاطره انداخته‌اند. تولید انبوه فرآورده‌های دام و طیور دامپروری‌های صنعتی و تجمع فضولات حیوانی که جزء لاینفک آن می‌باشد از یک سو و استفاده گسترده از کودهای شیمیایی از سوی دیگر، باعث شده تا امروزه استفاده از این محصول فرعی دامپروری‌ها به یک مشکل تبدیل شود. هزینه زیاد حمل و نقل کود دامی، همچنین اقتصادی‌تر بودن مصرف کودهای شیمیایی در اراضی، موجب بی‌مصرف ماندن کودهای حیوانی و تجمع آن در اطراف مزارع بزرگ دامپروری‌ها شده است، به طوری که در بعضی موارد نه تنها کود تولید شده قابل فروش نبوده، بلکه این واحدها مجبور به تحمل هزینه‌های گزاف برای معدوم نمودن آن می‌باشند.

از دیدگاه فیزیکی، کود به صورت مخلوطی از آب و مواد جامد می‌باشد. مواد جامد کود معرف مواد تجزیه شدنی و معلق درون کود می‌باشند. معمولاً کود را به چهار حالت: مایع<sup>۱</sup>،

2. slurry  
3. semisolid  
4. solid

E-mail: kianmehr@ut.ac.ir

\* نویسنده مسئول

1. liquid

در این روش تغییرات دمای ماده مورد نظر که در داخل یک استوانه قرار داده شده است، نسبت به زمان در طی یک انتقال حرارت گذرا ثبت می‌شود، سپس با تعیین شیب منحنی دما در مقابل زمان ( $A$ )، قطر استوانه ( $R$ )، دمای مرکز استوانه حاوی ماده مورد آزمایش ( $T_c$ ) و دمای بدنه استوانه ( $T_s$ ) با استفاده از رابطه ۲ می‌توان ضریب انتشار حرارت را محاسبه نمود (Dickerson, 1965).

$$\alpha = \frac{AR^2}{4(T_s - T_c)} \quad (2)$$

با استفاده از قانون گرمایش و سرمایش فوریه برای یک جسم کروی می‌توان ضریب انتشار حرارت را به طور مستقیم به دست آورد. در این روش هم از شیب منحنی تغییرات دمای ماده در مقابل زمان در حالت انتقال حرارت گذرا استفاده می‌شود (Ayrton & Perry, 1878).

Babit (۱۹۴۵) ضریب انتشار حرارت توده گندم را با استفاده از روش پراب در رطوبت ۹/۲٪،  $1/15 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  گزارش کرد. Loklari *et al.* (۱۹۵۷) با استفاده از روشی مشابه با روش دیکرسون، ضریب انتشار حرارت توتون را تعیین کردند. آن‌ها گزارش کردند که ضریب انتشار حرارت واریته‌های *Bright*، *Maryland* و *Turkish* از رطوبت‌های ۲ تا ۲۰٪ روند کاهشی داشته و در محدوده رطوبت‌های ۲۰٪ تا نزدیک ۴۰٪ روند افزایشی نشان می‌دهد. Wratten *et al.* (۱۹۶۵) ضریب انتشار حرارت شلتوک را بین  $0/856 \times 10^{-7}$  تا  $3/45 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  به ترتیب در رطوبت‌های ۱۲ تا ۲۰٪ تعیین کردند. Kazarian & Hall (۱۹۶۵) با روش پراب ضریب انتشار حرارت گندم و ذرت را در رطوبت‌های مختلف با پنج تکرار تعیین کردند و یک رابطه غیر خطی برای تخمین ضریب انتشار حرارت با تغییر رطوبت ارائه کردند. آن‌ها همچنین گزارش کردند که ضریب انتشار حرارت گندم از رطوبت ۲ تا ۲۰٪ روند کاهشی دارد، همچنین ضریب انتشار حرارت ذرت از رطوبت ۲ تا ۲۰٪ روند کاهشی داشته و از رطوبت ۲۰ تا ۳۰٪ روند افزایشی نشان می‌دهد. ضریب انتشار حرارت کود گاوی به طور غیر مستقیم با اندازه‌گیری گرمای ویژه ( $c$ )، ضریب هدایت حرارت ( $k$ ) و با داشتن وزن مخصوص آن، توسط Houkom *et al.* (۱۹۷۴) به میزان  $1/625 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  محاسبه شد. ضریب انتشار حرارت برخی مواد غذایی با روش غیر مستقیم توسط Sweat (۱۹۸۶) محاسبه شد. Hsu *et al.* (۱۹۹۱) گزارش کردند که ضریب انتشار حرارت پسته در دمای اتاق و در محدوده رطوبتی ۸ تا ۶۵٪ از  $0/32 \times 10^{-7}$  تا  $0/48 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  کاهش می‌یابد. Iwabuchi *et al.* (۱۹۹۹) با استفاده از روش پراب به طور

رشد عوامل بیماری‌زا برای دام‌ها می‌باشد. علاوه بر این، کود دیو شده باعث انتشار آمونیاک، اکسید نیتروژن، گاز متان و بوی نامطبوع می‌شود (Burton, 1997). انتشار این مواد در طبیعت باعث به وجود آمدن آلودگی زیست محیطی خواهد شد (El-Ahraf & Willis, 1996). نگهداری کود گاو با رطوبت کم باعث کاهش آلودگی‌های زیست محیطی حاصل از آن می‌شود. یکی از روش‌هایی که برای کاهش رطوبت کود گاو می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد خشک کردن آن می‌باشد. کود خشک دارای آلودگی کمتری نسبت به کود تازه است. کود خشک را می‌توان به‌عنوان یک ماده آلی مفید در زمین‌های کشاورزی به‌کار برد. همچنین می‌توان از آن برای تهیه بستر در گاو‌داری‌ها استفاده نمود. یکی از روش‌های قدیمی خشک کردن کود، استفاده از گرمای خورشید است. از مزیت‌های مهم این روش کم بودن هزینه مصرفی می‌باشد؛ اما این روش دارای مشکلاتی از قبیل ایجاد آلودگی محیطی، طولانی بودن زمان خشک شدن و پخش شدن کود در محیط می‌باشد. مشکلاتی از این قبیل استفاده از تکنولوژی‌های جدید برای فرآیند خشک کردن کود را ضروری نموده است. برای طراحی و ساخت یک خشک‌کن مناسب جهت خشک کردن کود، دانستن خواص فیزیکی و حرارتی کود از قبیل چسبندگی، اصطکاک، ضریب هدایت حرارت، گرمای ویژه و ضریب انتشار حرارت کود ضروری می‌باشد.

روش‌های گوناگونی برای اندازه‌گیری ضریب انتشار حرارت مواد وجود دارد. روش‌های تعیین ضریب انتشار حرارت به دو دسته کلی روش مستقیم و روش غیرمستقیم تقسیم‌بندی می‌شوند. در روش غیرمستقیم با داشتن ضریب هدایت حرارت  $k$ ، گرمای ویژه  $c_p$  و جرم حجمی ماده از رابطه ۱ می‌توان ضریب انتشار حرارت را محاسبه کرد (Mohsenin, 1980).

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (1)$$

روش‌های مختلفی برای تعیین مستقیم ضریب انتشار حرارت مواد وجود دارد. یکی از روش‌های مستقیم تعیین ضریب انتشار حرارت مواد، استفاده از پراب<sup>۱</sup> است. در این روش از دو ترموکوپل که در فاصله  $r$  از یکدیگر قرار دارند و یکی از ترموکوپل‌ها در مرکز پراب می‌باشد، برای تعیین ضریب انتشار حرارت مواد استفاده می‌شود (Nix *et al.*, 1967). جسم استوانه‌ای و داده‌های زمان-دما<sup>۲</sup> (روش دیکرسون<sup>۳</sup>) یکی دیگر از روش‌های مستقیم تعیین ضریب انتشار حرارت مواد می‌باشد.

1. probe  
2. Cylindrical object and time-temperature data.  
3. Dickerson

کشاورزی پردیس ابوریحان- دانشگاه تهران منتقل شد. کود تهیه شده از گاوداری (کود تازه دفع شده از دام)، با هم مخلوط شد تا به صورت یکنواخت در آید و سپس در داخل کیسه‌های نایلونی در دمای  $5^{\circ}\text{C}$  در یخچال نگهداری شد تا رطوبت آن یکنواخت شود. قابل ذکر است که کود تهیه شده به صورت تازه و عاری از هرگونه مواد خارجی، همانند مواد بستر شامل خرده چوب، ماسه، پسماند غذای دام و غیره بود. برای رسیدن به رطوبت‌های مختلف کود جهت آزمایش، کود تازه در معرض هوای آزاد قرار گرفت و در زمان‌های مختلف از آن نمونه تهیه شد. برای تعیین رطوبت (Moisture Content) اولیه سه نمونه  $350$  گرمی از کود طبق استاندارد، به مدت  $24$  ساعت در دمای  $20 \pm 0.3$  درجه سلسیوس در آن قرار داده شد (ASAE, 2002).

### تئوری آزمایش

این روش بر مبنای اندازه‌گیری تغییرات دمای داخلی یک نمونه استوانه‌ای از مواد استوار است. طول این استوانه  $2L$  و قطر آن  $2R$  می‌باشد. محور طولی استوانه منطبق بر محور  $x$  در نظر گرفته شد. فرض می‌شود که نمونه داخل استوانه همگن بوده و ضریب انتقال حرارت اطراف استوانه  $h$  می‌باشد. انتقال حرارت از طریق هدایت در داخل یک استوانه نامحدود را می‌توان با معادله فوری در مختصات استوانه‌ای به صورت رابطه (۳) بیان کرد (Bairi & Laraqi, 2003):

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

که در این رابطه  $T$  دما بر حسب درجه سلسیوس،  $r$  شعاع استوانه بر حسب متر،  $x$  طول محور مرکزی استوانه بر حسب متر،  $\alpha$  ضریب انتشار حرارت ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) و  $t$  زمان بر حسب ثانیه می‌باشد.

چنانچه نسبت طول استوانه به شعاع آن به قدر کافی بزرگ در نظر گرفته شود (حداقل ده به یک) گرادیان حرارتی در جهت محور مرکزی استوانه، نسبت به گرادیان حرارتی در جهت شعاع استوانه کم می‌شود، بنابراین تبادل حرارت استوانه با محیط تنها منحصر به سطح جانبی آن شده و می‌توان از جمله  $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$  در معادله (۳) صرف‌نظر کرد (Jain & Pathare, 2007). با این اوصاف مسئله به صورت یک بعدی قابل حل می‌باشد. بنابراین معادله (۳) را می‌توان به صورت معادله (۴) نوشت:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

Bairi & Laraqi (۲۰۰۳) معادله (۴) را به صورت معادله (۵) حل کردند:

مستقیم ضریب انتشار حرارت کود گاوی با مخلوطی از خرده چوب را اندازه‌گیری کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که مقدار ضریب پخش حرارت کود گاوی مخلوط شده با خرده چوب برابر با  $1.18 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  می‌باشد. ضریب انتشار حرارت زیره سبز توسط Singh & Goswami (۲۰۰۰) با روش غیرمستقیم محاسبه شد. آن‌ها همچنین گزارش کردند که ضریب انتشار حرارت زیره سبز در محدوده  $0.653 \times 10^{-7}$  تا  $1.664 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  با افزایش دما از  $50^{\circ}\text{C}$  تا  $50^{\circ}\text{C}$  در رطوبت  $7/18$ ٪ افزایش می‌یابد. همچنین مقدار این ضریب برای زیره سبز از  $1.472 \times 10^{-7}$  تا  $1.287 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  با افزایش رطوبت از  $1/8$  تا  $11/1$ ٪ در  $10^{\circ}\text{C}$  کاهش یافته و سپس با افزایش رطوبت به  $20/5$ ٪ تا  $1.396 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  افزایش می‌یابد. ضریب انتشار حرارت گل گاوزبان را Yang et al. (۲۰۰۲) تعیین کردند. روشی برای اندازه‌گیری ضریب انتشار حرارت توسط Weidenfeller & Hofer (۲۰۰۴) مانیت، سولفات باریم و مس پیشنهاد شده است. ضریب انتشار حرارت روغن زیتون با روشی مستقیم توسط Kubasek et al. (۲۰۰۶) تخمین زده شده است. علاوه بر روش‌های یاد شده روش‌های دیگری هم برای اندازه‌گیری ضریب انتشار حرارت مواد (جامد، گرانولی، خمیری و مایع) وجود دارد؛ ولی هر کدام از این روش‌ها نیازمند وسایل پیچیده و شرایط دشواری برای انجام آزمایش هستند (Jain & Pathare, 2007). محاسبه ضریب انتشار حرارت با استفاده از حل یک بعدی معادله فوری روش قابل اطمینان و ثابت شده‌ای است که دارای خطای بسیار اندکی می‌باشد (Bairi et al., 2007). برای اولین بار Bairi et al. (۲۰۰۷) از این روش جهت تعیین ضریب انتشار حرارت برخی از مایعات، گوشت و مواد کشاورزی استفاده کردند. با استفاده از روش حل یک بعدی معادله فوری Jain & Pathare (۲۰۰۷) ضریب انتشار حرارت ماهی تازه را تعیین کردند.

هدف اصلی این تحقیق تعیین ضریب انتشار حرارت کود در دماها و رطوبت‌های مختلف با استفاده از روش به دست آمده از حل یک بعدی معادله فوری برای استوانه نامحدود و تعیین یک معادله برای پیش‌بینی ضریب انتشار حرارت کود بر حسب دما و محتوای رطوبتی آن می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

#### تهیه نمونه

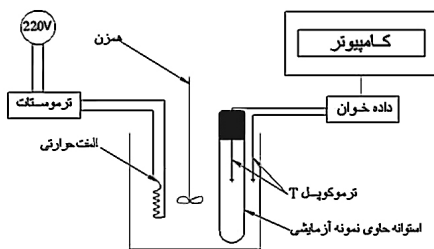
کود تازه مورد استفاده برای این تحقیق از دامداری قزلاق واقع در روستای قلعه‌نو از توابع شهرستان پاکدشت تهیه و برای انجام آزمایش‌ها به آزمایشگاه خواص حرارتی محصولات

نمودار  $\ln(\theta)$  در مقابل زمان یک خط مستقیم است. با تعیین دقیق شیب منحنی  $\ln(\theta)$  در مقابل زمان، مقدار  $\tau$  به دست می آید و با استفاده از معادله (۱۲) ضریب انتشار حرارت محاسبه خواهد شد.

$$\alpha = \frac{1}{\tau} \left( \frac{R}{2.405} \right)^2 \quad (12)$$

### شرح آزمایش

نمونه‌های کود در داخل یک استوانه آلومینیومی با دیواره بسیار نازک با طول ۱۵۰ میلی‌متر و قطر ۷/۵ میلی‌متر، قرار داده شد. به منظور قرائت دمای مرکز نمونه، یک ترموکوپل  $T$  بر روی محور مرکزی استوانه و در وسط ارتفاع آن قرار داده شد. استوانه به همراه نمونه در داخل آب با دمای معین قرار گرفت (برای آزمایش در دماهای ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰°C دمای آب به ترتیب ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰°C در نظر گرفته شد) تا نمونه و استوانه با آب هم دما شوند، سپس استوانه حاوی نمونه در داخل حمام آب با دمای پایین (برای آزمایش در دماهای ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰°C دمای منبع به ترتیب ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰°C در نظر گرفته شد) قرار داده شد و تغییرات دمای مرکز نمونه با استفاده از یک داده خوان<sup>۲</sup> (CHY502A, Taiwan) در کامپیوتر ثبت گردید (شکل ۱).



شکل ۱- طرحواره‌ای از تجهیزات مورد استفاده در آزمایش ضریب انتشار حرارت

دمای حمام آب را می‌توان بین ۱۰ تا ۸۰°C، بوسیله یک همزن و سرد کننده (برای آزمایش در دماهای پایین) یا یک گرم‌کن متصل به ترموستات (برای آزمایش در دماهای بالا) تنظیم کرد. دمای حمام طوری تنظیم شد تا یک گرادیان حرارتی از بیرون به درون استوانه یا بالعکس، حداکثر در مدت دو دقیقه به وجود آید. با ثبت تغییر دمای به وجود آمده در مرکز استوانه در اثر گرادیان حرارتی بین نمونه داخل استوانه و حمام آب، مقدار  $\theta$  از رابطه (۱۳) به دست می‌آید:

$$\theta = \frac{T - T_e}{T_0 - T_e} \quad (13)$$

$$\theta(r, t) = \frac{T(r, t) - T_e}{T_0 - T_e} = \quad (5)$$

$$2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp(-\xi_n^2 Fo_c) \frac{1}{\xi_n} \frac{J_1(\xi_n)}{J_0^2(\xi_n) + J_1^2(\xi_n)} J_0(\xi_n r^*) \quad (5)$$

که  $\theta$  دمای نسبی و بدون بعد،  $T_0$  دمای اولیه مرکز نمونه کود داخل استوانه بر حسب سلسیوس،  $T_e$  دمای محیطی که استوانه به همراه نمونه در آن قرار می‌گیرد، بر حسب سلسیوس،  $J_0$  و  $J_1$  توابع بسل<sup>۱</sup> نوع اول، به ترتیب با مرتبه صفر و یک می‌باشند.  $r^*$  نسبت تغییر شعاع (بدون بعد) بوده و برابر است با  $r^* = r/R$  به طوری که  $0 \leq r^* \leq 1$  می‌باشد.  $\xi_n$  ریشه‌های مثبت معادله مشخصه (۶) و  $\xi_1$  اولین ریشه مثبت معادله مشخصه هستند.

$$\xi_m J_1(\xi_m) - Bi_c J_0(\xi_m) = 0 \quad (6)$$

$Bi_c$  عدد بدون بعد Biot اصلاح شده است که از معادله (۷) محاسبه می‌شود:

$$Bi_c = \frac{hR}{\lambda} \quad (7)$$

که  $\lambda$  ضریب هدایت حرارت بر حسب (W/m K) می‌باشد.  $Fo_c$  عدد بدون بعد فوریه اصلاح شده است که توسط معادله (۸) محاسبه می‌شود:

$$Fo_c = \frac{\alpha t}{R^2} \quad (8)$$

$\alpha$  ضریب پخش حرارت بر حسب  $m^2/s$  می‌باشد. زمانی که ضریب انتقال حرارت خیلی بزرگ باشد، تنها جمله اول معادله (۵) تقریب خوبی برای حل معادله فوریه در مختصات استوانه‌ای می‌باشد (Bairi & Laraqi, 2007). بنابراین معادله (۵) را به صورت رابطه (۹) می‌توان بازنویسی نمود.

$$\theta(r, t) = \left\{ 2 \left( \frac{1}{\xi_1} \frac{J_1(\xi_1)}{J_0^2(\xi_1) + J_1^2(\xi_1)} \right) J_0(\xi_1 r^*) \right\} \exp[-(\xi_1^2 Fo_c)] \quad (9)$$

با در نظر گرفتن  $k$  برای قسمت ثابت معادله (۹) داریم:

$$\theta(r, t) = k \exp[-(\xi_1^2 Fo_c)] = k \exp \left[ -\alpha \left( \frac{\xi_1^2}{R^2} \right) t \right] \quad (10)$$

ریشه اول معادله مشخصه (۶) زمانیکه ضریب انتقال حرارت خیلی بزرگ باشد برابر ۲/۴۰۵ خواهد بود ( $\xi_1 = 2/405$ ). در زمان کوتاه  $t$  که  $Fo_c$  به حداقل مقدار خود می‌رسد، معادله گسسته فوریه به خوبی همگرا می‌شود. مقدار ثابت زمانی  $\tau$  از رابطه (۱۱) به دست می‌آید.

$$\tau = \left[ \alpha \left( \frac{\xi_1^2}{R^2} \right) \right]^{-1} \quad (11)$$

و خطای استاندارد ( $e_s$ ) بین  $0/01215$  تا  $0/09656$  می‌باشد. رابطه خطی بین لگاریتم دما و زمان سرد شدن نشان دهنده دقت بالای ضریب انتشار حرارت محاسبه شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، در رطوبت‌های ثابت با افزایش دما مقدار شیب خطوط ( $A/I$ ) افزایش می‌یابد. همچنین در دمای ثابت با افزایش رطوبت از  $20$  به  $40\%$  مقدار شیب ( $A/I$ ) افزایش یافته و پس از آن روند کاهشی دارد. ضریب انتشار حرارت با استفاده از معادله (۱۲) و با توجه به مقدار شیب خطوط به‌دست آمده از رسم  $\ln(\theta)$  در مقابل زمان سرد شدن و معلوم بودن شعاع استوانه استفاده شده در آزمایش در محدوده  $0/904 \times 10^{-7}$  تا  $2/11 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  به‌دست آمد. اعداد به‌دست آمده با نتایج حاصله از تحقیق بر روی مواد کشاورزی همخوانی دارد. ضریب انتشار حرارت توده گندم با استفاده از روش پراب در رطوبت  $9/2\%$  توسط Babbit (۱۹۴۵)،  $1/15 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  گزارش شد. Wratten *et al.* (۱۹۶۵) ضریب انتشار حرارت شلتوک را در محدوده  $0/856 \times 10^{-7}$  تا  $3/45 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  برای محدوده رطوبتی  $12$  تا  $20\%$  تعیین کردند. مقدار ضریب پخش حرارت کود گاوی توسط Houkom *et al.* (۱۹۷۴)،  $1/625 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  محاسبه شده است. Iwabuchi *et al.* (۱۹۹۹) مقدار ضریب پخش حرارت کود گاوی مخلوط شده با خرده چوب را  $1/18 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  گزارش کردند.

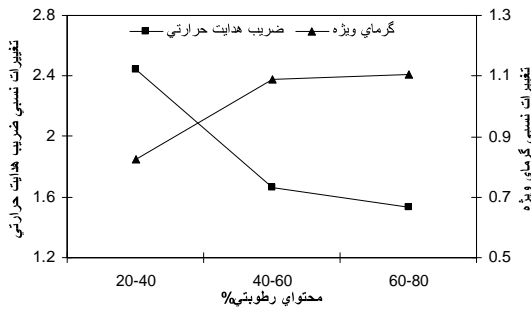
که  $T$  تغییرات دمای ثبت شده بوسیله داده‌خون،  $T_e$  دمای حمام آب و  $T_0$  دمای اولیه مرکز نمونه می‌باشند. با رسم نمودار  $\ln(\theta)$  در مقابل زمان ( $t$ ) و تعیین شیب این نمودار ضریب پخش حرارت از معادله (۱۲) به‌دست می‌آید. این مراحل آزمایشی برای چهار سطح رطوبت (MC)  $20$ ،  $40$ ،  $60$  و  $82$  درصد (با دقت  $\pm 1\%$ ) و در دماهای  $40$ ،  $50$ ،  $60$  و  $70$  درجه سلسیوس در سه تکرار انجام گرفت. لازم به ذکر است که مقدار متوسط دمای مواد ( $T_0$ ) و دمای محیط ( $T_e$ ) دمایی است که مقدار ضریب پخش حرارت در آن محاسبه شده است.

### نتایج و بحث

شکل (۲) نمودار  $\ln(\theta)$  در مقابل زمان سرد شدن نمونه‌های کود در دمای  $40^\circ\text{C}$  و رطوبت‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است، رابطه‌ای خطی با شیب منفی بین  $\ln(\theta)$  و زمان سرد شدن برای رطوبت‌های مختلف وجود دارد، همچنین با افزایش میزان رطوبت مقدار شیب ( $A/I$ ) کاهش می‌یابد. رابطه بین زمان سرد شدن و  $\ln(\theta)$  با استفاده از تحلیل رگرسیون برای رطوبت‌ها و دماهای مورد آزمایش به‌دست آمد. در جدول (۱) ضرایب رابطه خطی بین  $\ln(\theta)$  و زمان سرد شدن به همراه ضریب تعیین ( $R^2$ ) و خطای استاندارد رگرسیون ( $e_s$ ) برای نمونه‌های کود در رطوبت‌ها و دماهای مورد آزمایش آمده‌اند. مقدار  $R^2$  از  $0/9901$  تا  $0/9994$

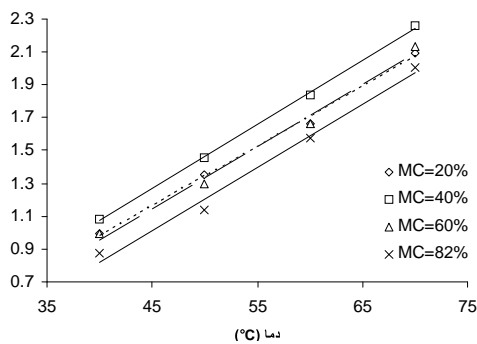
جدول ۱- ضرایب رابطه بین  $\ln(\theta)$  و زمان سرد شدن ( $\ln(\theta) = At + B$ ) در دماها و رطوبت‌های مورد آزمایش.

$e_s$	$R^2$	ضرایب رابطه خطی		رطوبت %	دما ( $^\circ\text{C}$ )
		B	A		
$0/05977$	$0/99117$	$-0/10614$	$-0/01019$	20	40
$0/09656$	$0/9970$	$-0/15968$	$-0/01113$	40	
$0/08052$	$0/9901$	$-0/22818$	$-0/01024$	60	
$0/07433$	$0/9965$	$-0/02039$	$-0/00897$	82	
$0/06497$	$0/9973$	$-0/09751$	$-0/01387$	20	50
$0/02481$	$0/9994$	$-0/03698$	$-0/01495$	40	
$0/01215$	$0/9902$	$-0/33803$	$-0/01338$	60	
$0/06488$	$0/9904$	$-0/12271$	$-0/01169$	82	
$0/08421$	$0/9922$	$-0/13685$	$-0/01709$	20	60
$0/03315$	$0/9992$	$0/02197$	$-0/01894$	40	
$0/07254$	$0/9972$	$-0/26793$	$-0/01709$	60	
$0/06627$	$0/9972$	$0/00140$	$-0/01621$	82	
$0/07735$	$0/9924$	$-0/23461$	$-0/02155$	20	70
$0/04612$	$0/9972$	$0/09635$	$-0/02224$	40	
$0/07668$	$0/9957$	$-0/32612$	$-0/02196$	60	
$0/07796$	$0/9913$	$0/01677$	$-0/02061$	82	



شکل ۴- تغییرات نسبی گرمای ویژه و ضریب هدایت حرارتی کود گاو نسبت به رطوبت.

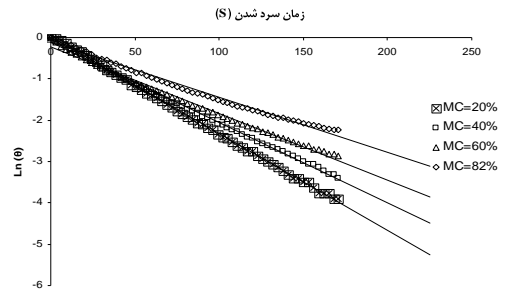
شکل ۵ تاثیر افزایش دما بر  $\alpha$  در رطوبت‌های مورد آزمایش را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۵ مشخص است، با افزایش دما مقدار  $\alpha$  به صورت خطی افزایش می‌یابد. همچنین خط مربوط به سطح رطوبتی ۴۰٪ از بقیه سطوح رطوبتی بالاتر قرار دارد که این پدیده در شکل ۳ نشان داده شد. *Fito et al.* (۱۹۸۴) گزارش کردند که ضریب انتشار حرارت مواد غذایی جامد با افزایش دما به طور تقریباً خطی افزایش می‌یابد. نتایج تحقیقات *Singh & Goswami* (۲۰۰۰) نشان داد که ضریب انتشار حرارت زیره سبز از  $0.1653 \times 10^{-7}$  تا  $1.664 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  با افزایش دما از  $-50^\circ\text{C}$  تا  $50^\circ\text{C}$  در رطوبت  $7/18$ ٪ افزایش می‌یابد. همچنین مقدار این ضریب برای زیره سبز از  $1/472 \times 10^{-7}$  تا  $1/287 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  با افزایش رطوبت از  $1/8$  تا  $11/1$ ٪ در  $10^\circ\text{C}$  کاهش یافته و سپس با افزایش رطوبت به  $2/05$ ٪ ضریب انتشار حرارت تا  $1/396 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  افزایش می‌یابد.



شکل ۵- تغییرات  $\alpha$  با افزایش دما در رطوبت‌های ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۲ درصد.

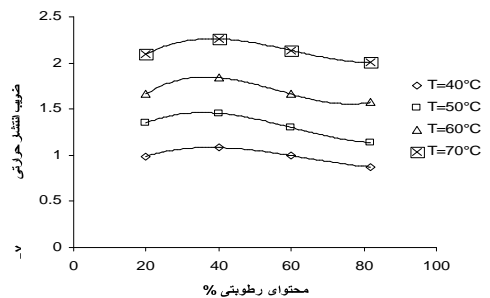
با استفاده از تحلیل رگرسیون چند متغیره روابط (۱۴) و (۱۵) بین  $\alpha$ ، محتوای رطوبت (MC) و دماهای (T) مورد آزمایش به‌دست آمد.

$$\alpha = -7.346 \times 10^{-8} + 3.791 \times 10^{-9} T + 1.241 \times 10^{-9} MC - 1.465 \times 10^{-11} MC^2 \quad (14)$$



شکل ۲- لگاریتم بدون بعد دما ( $\ln(\theta)$ ) در مقابل زمان سرد شدن کود در دمای  $40^\circ\text{C}$  در چهار سطح رطوبتی.

شکل (۳) تاثیر میزان رطوبت را بر  $\alpha$  نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش رطوبت از ۲۰ به ۴۰٪،  $\alpha$  افزایش یافته و پس از آن در رطوبت‌های بیشتر از ۴۰٪ کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش دما از  $40^\circ\text{C}$  به  $70^\circ\text{C}$  منحنی‌ها در سطوح بالاتری قرار می‌گیرند. با توجه به معادله (۱) گرمای ویژه، ضریب هدایت حرارت و جرم حجمی کود در ضریب انتشار حرارتی موثر می‌باشند. نتایج حاصل از اندازه‌گیری گرمای ویژه و ضریب هدایت حرارتی در شکل (۴) نشان می‌دهد تا رطوبت ۴۰٪ با ثابت بودن جرم حجمی با توجه به رابطه (۱) مقدار ضریب پخش حرارتی به حداکثر خود می‌رسد و بعد از نقطه مذکور با عنایت به شیب منفی خط ضریب هدایت حرارتی و شیب مثبت خط گرمای ویژه مقدار ضریب پخش حرارتی کاهش می‌یابد. در مورد برخی از مواد نتایج مشابه به‌دست آمده است. *Loklari et al.* (۱۹۵۷) گزارش کردند که ضریب انتشار حرارت واریته‌های *Turkish* و *Maryland, Bright* توتون در محدوده رطوبتی از ۲ تا ۲۰٪ روند کاهشی داشته و در محدوده رطوبت‌های ۲۰٪ تا نزدیک ۴۰٪ روند افزایشی نشان می‌دهد. نتایج آزمایش‌های *Kazarian & Hall* (۱۹۶۵) نشان داد که ضریب انتشار حرارت گندم از رطوبت ۲ تا ۲۰٪ کاهش می‌یابد، همچنین ضریب انتشار حرارت ذرت از رطوبت ۲ تا ۲۰٪ کاهش یافته و از رطوبت ۲۰ تا ۳۰٪ روند افزایشی نشان می‌دهد.



شکل ۳- تغییرات  $\alpha$  با افزایش رطوبت در دماهای ۴۰، ۵۰، ۶۰ و  $70^\circ\text{C}$

زاویه تقریباً ۴۵ درجه به داده‌ها می‌توان برآزش داد که نشان دهنده دقت بسیار مطلوب مدل پیشنهادی در تخمین مقادیر  $\alpha$  می‌باشد.

#### نتیجه‌گیری

به طور کلی موارد زیر را می‌توان از این مقاله نتیجه‌گیری نمود:

- ۱- ضریب انتشار حرارت کود گاوی با استفاده از حل یک بعدی معادله حرارتی فوریه برای یک استوانه،  $0.904 \times 10^{-7}$  تا  $2/11 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  به دست آمد.
- ۲- در رطوبت‌های آزمایش شده مقدار  $\alpha$  با افزایش دما به صورت خطی افزایش یافت.
- ۳- ضریب انتشار حرارت کود گاوی با افزایش رطوبت از ۲۰ به ۴۰٪ افزایش یافته و پس از آن روند کاهشی نشان داد.
- ۴- یک مدل رگرسیونی پیشنهادی (رابطه ۱۴) را با دقت بسیار مطلوبی می‌توان برای تخمین  $\alpha$  مورد استفاده قرار داد.

#### سپاسگزاری

از معاونت پژوهشی پردیس ابوریحان- دانشگاه تهران به جهت مساعدت و تامین هزینه‌های لازم تشکر و قدردانی می‌گردد.

#### REFERENCES

Amin-Nyveri, M. (2008). *Construction and evaluation of a prototype moist dairy cattle manure dryer*. M. Sc, dissertation, university of Tehran, Aboureihan campus. (In Farsi)

ASAE. (2002). ASAE standard S385.2. Moisture Measurement Forages. ST. Joseph. MI: U.S.A.

Ayrton, W.R. & J. Perry. (1878). Experimental on the heat conductivity of stone based on Fourier's "Theoric de la Chaleur." *Philosophical Magazine*, 5<sup>th</sup> Series, 5: 241-269.

Babbitt, J.D. (1945). The thermal properties of grain in bulk. *Can. J. of Res.*, F23: 388-401.

Bairi, A. & N. Laraqi. (2003). Diagrams for fast transient conduction in sphere and long cylinder subject to sudden and violent thermal effects on its surface. *Applied Thermal Engineering*, 23(11): 1373-1390.

Bairi, A., N. Laraqi, & J.M.G.D, Maria. (2007). Determination of thermal diffusivity of foods using 1D Fourier cylindrical solution. *Journal of Food Engineering*, 78(2): 669-675.

Burton, C.H. (1997). Manure management - treatment strategies for sustainable agriculture. Silsoe Research Institute, Bedford, UK.

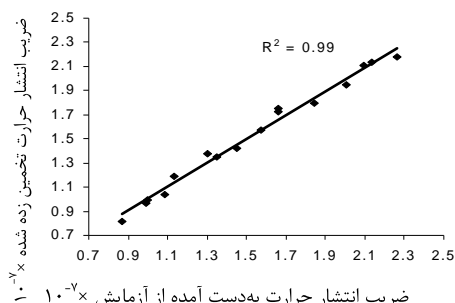
Dickerson, R.W. (1965). An apparatus for measurement of thermal diffusivity of foods. *Food Technology*, 19(5): 198-204.

El-Ahraf, A, & W.V. Willis. (1996). Management of

(۱۵)

$$\alpha = -5.262 \times 10^{-8} + 3.791 \times 10^{-9} T - 2.564 \times 10^{-10} MC$$

آزمون  $F$  نشان داد که مدل‌های پیشنهادی بسیار معنی‌دار است، همچنین نتایج آزمون  $t$  ضرایب مدل‌ها نشان داد که تمامی ضرایب در سطح ۱٪ معنی‌دار هستند. مقدار ضریب تعیین  $R^2$  برای معادله (۱۴) و (۱۵) به ترتیب ۰/۹۹ و ۰/۹۷ به دست آمد.



مقایسه بین مقادیر ضریب انتشار حرارت اندازه‌گیری شده و مقادیر تخمین زده شده توسط رابطه (۱۴) در شکل (۶) انجام شده است. همانگونه که از این شکل مشاهده می‌شود خطی با

animal waste: environmental health problems and technological solutions. Praeger Publishers, Westport, USA.

Fito, P.J., F. Pi?aga, & V. Aranda. 1984. Thermal conductivity of porous bodies at low pressure: Part I. *Journal of Food Engineering*, 3: 75-88.

Jain, D. & P.B. Pathare. (2007). Determination of thermal diffusivity of freshwater fish during ice storage by using a one-dimensional Fourier cylindrical equation. *Biosystems Engineering*, 96(3):407-412.

Houkom, R.L., A.F. Butchbaker, & G.H. Bruswitz. (1974). Effect of moisture content thermal diffusivity of boof manure. *Transactions of the ASAE*, 17: 973-977.

Hsu, M.H., J.D. Mannaperuma, & R.P. Singh. (1991). Physical and thermal properties of pistachios. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 49(4):311-321.

Iwabuchi, K., T. Kimura, & L. Otten. (1999). Effect of volumetric water content on thermal properties of dairy cattle feces mixed with sawdust. *Bioresource Technology*, 70: 293-297.

Kazarian, E.A. & C.W. Hall. (1965). The thermal properties of grain. *Transactions of the ASAE*, 8(1): 33-37- 40.

Kub?sek, M., M. Houska., A. Landfeld., J. Strohal., J. Kamar?d, & R. Zitny'. (2006). Thermal diffusivity estimation of the olive oil during its

- high-pressure treatment. *Journal of Food Engineering*, 74(3): 286–291.
- Landry, H., C. Laguë, & M. Roberge. (2004). Physical and rheological properties of manure products. *Applied Engineering in Agriculture*, 20(3): 277–288.
- Loklari, E.E., W.D. Galloway, & M. Samfield. (1957). The thermal conductivity of tobacco. *Tobacco Science*, 28(February 15): 28–32.
- Mohsenin, N.N. (1980). *Thermal properties of foods and agricultural materials*. New York, NY: Gordon and Breach, Science Publishers, Inc.
- Nix, G.H., G.W. Lowery., R.I. Vachon, & G.E. Tanger. (1967). Direct determination of thermal diffusivity and conductivity with a refined line-source technique. *Progress in Aeronautics and Astronautics: Thermo physics of Spacecraft and Planetary Bodies*, 20: 865–878. Academic Press, New York.
- Singh, K.K. & T.K. Goswami. (2000). Thermal properties of cumin seed. *Journal of Food Engineering*, 45(2): 181–187.
- Sweat, V.E. (1986). Thermal properties of foods. In *Engineering Properties of Foods*, M. A. Rao and S. S. H. Rizvi. eds, 49. New York, NY: Marcel Dekker, Inc.
- Weidenfeller, B., M. Hofer, & F.R. Schilling. (2004). Thermal conductivity, thermal diffusivity and specific heat capacity of particle filled polypropylene. *Composites, Part A: Applied Science and Manufacturing*, 35(4): 423–429.
- Wratten, F.T., W.D. Poole., J.L. Chesness., S. Bal, & V. Ramarao. (1969). Physical and thermal properties of rough rice. *Transactions of the ASAE*, 12(6): 801–803.
- Yang, W., S. Sokhansanj., J. Tang, & P. Winter. (2002). Determination of thermal conductivity, specific heat and thermal diffusivity of borage seeds. *Biosystems Engineering*, 82(2): 169–176