

ضریب انتشار حرارتی قرص خوراک دام

احمد صادقی¹، هادی صائبی منفرد¹ و علی ماشاله کرمانی²

1 - مؤسسه آموزش عالی علمی کاربردی جهاد کشاورزی

2 - بخش تحقیقات فنی و مهندسی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی قزوین

آدرس پست الکترونیکی مکاتبه کننده: a_msadeghi@yahoo.com

چکیده

فرآیند پخت با بخار نقش مهمی در تولید قرص خوراک دام (پلت) داشته و شامل حرارت دهی، اضافه کردن رطوبت به مواد خام و مخلوط کردن آن می باشد. همچنین فرآیندهای خشک و خنک کردن قرص های تولید شده نیز متضمن پدیده ی انتقال حرارت می باشد. در این پژوهش ضریب انتشار حرارتی قرص های خوراک دام به عنوان تابعی از دما و رطوبت تعیین شد. بازه رطوبتی قرص ها از 11/8٪ بر پایه وزن تر تا 18/2٪ (رطوبت هنگام خروج از دستگاه قرص ساز) و بازه دمایی از 25 تا 85 درجه سلسیوس متغیر بود. اندازه گیری ضریب رسانش گرما از تکنیک حالت گذرا و با استفاده از روش منبع خط گرما انجام گردید. در این تحقیق معلوم گردید که کاهش رطوبت از 18/2٪ بر پایه وزن تر به 11/8٪، منجر به افزایش خطی در ضریب پخش گرما می شود. این ضریب به طور متوسط از $12/07 \times 10^{-8}$ تا $14/92 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ برای بازه ی رطوبتی فوق تغییر نمود. مقایسه میانگین توسط آزمون کمترین اختلاف معنی دار نشان داد که با افزایش دما از 25 تا 85 درجه سلسیوس میانگین ضریب پخش گرما ی پلت های مورد پژوهش کاهش یافته و از اختلاف معنی داری برخوردار گردیده است. متوسط ضریب پخش گرما برای ارقام مورد پژوهش از حداکثر $11/2 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ برای دمای 25°C تا حداقل $9/1 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ برای دمای 85 درجه سلسیوس بدست آمد. آزمایش های انجام شده روی دو گروه از قرص هایی که بر اساس قطر نامی طبقه بندی شده بودند، حکایت از عدم تفاوت معنی دار بین ضریب رسانش گرمایی این دو گروه داشت. همچنین در این پژوهش مدل تجربی از ضریب رسانش گرما ی قرص خوراک دام به عنوان تابعی از دما و محتوای رطوبتی ارائه گردید.

کلمات کلیدی: روش منبع خط گرما، ضریب پخش گرما، قرص خوراک دام

مقدمه

امروزه استفاده از قرص خوراک دام (پلت) در واحدهای دامپروری و آبیاری پروری به دلیل مزایای آن رایج گردیده است. علاوه بر این صنعت تولید خوراک دام کشور و کارخانجات تولید قرص خوراک دام توسعه ی قابل ملاحظه ای داشته اند. عمدتاً منافع استفاده از قرص خوراک دام به دو گروه مزایای فیزیکی و مزایای تغذیه ای پلت تقسیم بندی می شوند. مهمترین مزایای فیزیکی عبارتند از: سهولت حمل و نقل، کاهش تفکیک مواد تشکیل دهنده جیره، افزایش چگالی توده و ضایعات کمتر خوراک. علاوه بر موارد فوق استفاده از قرص خوراک دام سبب بهبود عملکرد و افزایش ضریب تبدیل نسبت به خوراک معمولی و با جیره یکسان می گردد [Behnke, 1996]. این بهبود عملکرد ناشی از مواردی مانند کاهش امکان تغذیه ی انتخابی توسط حیوان، انرژی و زمان کمتر مورد نیاز جهت دریافت و بلع مواد، بهبود ارزش غذایی نشاسته ها و پروتئینها در اثر حرارت و غیره می باشد. عوامل زیادی از جمله فرمولاسیون جیره غذایی، اندازه ذرات، تهویه، مشخصات دای و فرآیندهای خنک و خشک کردن بر کیفیت پلت تاثیر می گذارد. عملیات پخت با بخار نقش مهمی در فرایند تولید پلت ایفا می نماید [Gilpin et al., 2002]. به طور کلی، هدف

اصلی از عملیات پخت خوراک دام حرارت دهی ذرات، افزودن رطوبت و مخلوط کردن آن می باشد. در یک کاندیشنر، دما نسبتاً به آسارها کنترل بخار اضافه شده به مواد تنظیم می گردد. دمای مواد خروجی از کاندیشنر بین 76 تا 85°C معمول می باشد. دمای کاندیشنر باید به دقت کنترل شود تا از آسیب رساندن به ویتامین های حساس به گرما و اسیدهای آمینه جلوگیری گردد [Kannadhasan *et al.*, 2008]. درجه حرارت مواد خروجی باید به سرعت به دمای محیط (یا کمتر) و میزان رطوبت مواد نیز به 10-12٪ (یا کمتر) کاهش یابد تا امکان ذخیره سازی مناسب و جابه جایی فراهم گردد. بنابراین لازم است مواد پس از خروج از کاندیشنر خشک و خنک گردند. خواص حرارتی قرص خوراک دام از جمله مهم ترین عواملی است که باید در محاسبات مربوط به نرخ انتقال حرارت در طی عملیات پخت، خنک کردن و خشک کردن مورد توجه قرار گیرد [Bhadra *et al.*, 2010]. در تجزیه و تحلیل مسائل انتقال گرما لازم است از خواص متعدد ماده که به خواص ترموفیزیکی معروف است استفاده شود. این خواص به دو دسته متمایز تقسیم می شود: خواص انتقالی و ترمودینامیکی. خواص انتقالی شامل ضرایبی مانند ضریب رسانش گرمایی (k) و ضریب پخش گرما (α) است. از طرف دیگر خواص ترمودینامیکی به حالت تعادل یک سیستم مربوط می شود. چگالی (ρ) و گرمای ویژه (C) دو نمونه از این خواص اند که به طور گسترده در تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی به کار می روند. نسبت ضریب رسانش گرمایی به ظرفیت گرمایی حجمی که خاصیت مهمی در تجزیه و تحلیل انتقال گرما به شمار می آید، ضریب پخش گرما (α) نام دارد و بر حسب m²/s بیان می شود [Mohsenin, 1980]:

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

این کمیت معیاری از توانایی یک ماده در رسانش انرژی گرمایی در مقایسه با توانایی آن در ذخیره انرژی گرمایی است. مواد با α بزرگ به سرعت به تغییرات شرایط محیط خود پاسخ می دهند چراکه بالا بودن α هم می تواند ناشی از بزرگ بودن ضریب رسانش گرمایی باشد که نشان دهنده آهنگ سریع انتقال گرما است، هم می تواند ناشی از پایین بودن ظرفیت گرمایی حجمی (ρCp) باشد. پایین بودن ضریب رسانش گرمایی حجمی به معنای آن است که از انرژی در حال عبور از جسم، مقدار کمی جهت بالا بردن دمای جسم، جذب شده و انرژی بیشتری انتقال یافته است. در مقابل پاسخ موادی که ضریب پخش گرما در آنها کوچک است در برابر تغییرات شرایط گرمایی محیط خود کند بوده و زمان لازم برای رسیدن آنها به حالت تعادل طولانی تر است. معادله گرما در یک جسم جامد با استفاده از معادله پایستاری انرژی در یک عنصر حجمی و با مشخص نمودن فرایندهای انتقال انرژی و جایگذاری معادلات نرخ انتقال گرما (فوریه) بدست می آید:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

معادله (2) شکل کلی معادله پخش گرما در دستگاه مختصات کارتزین است. این معادله معمولاً معادله گرما نامیده می شود و ابزار اصلی تجزیه و تحلیل رسانش گرما است و چنانچه ضریب رسانش گرمایی (k) در سه بعد یکسان باشد (جسم نسبت به k همسانگرد باشد) معادله گرما به صورت زیر در می آید:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

¹ Isotrop

که در آن α ضریب پخش گرما و t زمان می باشد.

در یک سیستم با حالت پایایی رسانش گرما (شرایط دایم) که مقدار انرژی ذخیره شده تغییر نمی کند (دمای نقاط نسبت به زمان ثابت است) معادله گرما به صورت زیر درمی آید:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = 0 \quad (4)$$

معادله گرما همچنین ممکن است در مختصات استوانه ای یا کروی بیان گردد. شکل این معادله در دستگاه مختصات استوانه ای که در اندازه گیری خواص حرارتی مواد بیولوژیک بصورت گسترده ای مورد استفاده قرار می گیرد، بصورت زیر است:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5)$$

که در این رابطه r ، ϕ و z به ترتیب فاصله شعاعی، زاویه قطبی و فاصله محوری می باشد. برای حالتی که جسم بدون منبع حرارت داخلی بوده و k ثابت باشد معادله گرما در دستگاه مختصات استوانه ای به صورت زیر درمی آید:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

چنانچه فقط گرادیان دما در جهت شعاعی وجود داشته و در امتداد z (ارتفاع استوانه) و ϕ (شعاع قطبی در استوانه) دما یکنواخت باشد معادله فوق بدینصورت درمی آید:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (7)$$

با حل معادله اخیر می توان توزیع دما در یک استوانه نامتناهی (و یا عایق بندی شده در بالا و پایین) را به صورت تابعی از زمان بدست آورد. حل این معادلات نیاز به استفاده از ریاضیات پیشرفته داشته و تنها برای بعضی حالات ساده حل تحلیلی آن امکان پذیر است.

ضریب پخش گرمای مواد بیولوژیک

محققان زیادی برای تعیین ضریب پخش گرما از رابطه (1) استفاده نموده اند. بر این اساس با دانستن مقدار سه خاصیت ضریب رسانش گرمایی، گرمای ویژه و چگالی، ضریب پخش گرما محاسبه می گردد. قازاریان و هال از این روش ضریب پخش گرما را برای گندم و ذرت تعیین نمودند [Kazarian and Hall, 1965]. راتن و همکاران نسبت به محاسبه ضریب پخش گرمای برنج از این رابطه مبادرت ورزیده و رابطه زیر را بر حسب رطوبت ارائه نمودند [Wratten et al., 1969]:

$$\alpha = 0.00523 + 9/65 \times 10^{-5} M \quad (8)$$

که در این رابطه M درصد رطوبت (بر پایه وزن تر) و α ضریب پخش گرما بر حسب ft^2/hr می باشد. ضریب پخش گرمای بسیاری از مواد غذایی و محصولات کشاورزی از این روش مورد بررسی قرار گرفته است.

روش دیگری توسط نیکس و همکاران جهت اندازه گیری ضریب پخش گرما بر پایه استفاده از کاوشگر رسانش گرمایی در سال 1967 ارائه گردید [Mohsenin, 1980]. در این روش یک یا دو حسگر دما در فاصله معینی از

کاوشگر رسانش گرمایی و درون توده محصول قرار گرفته و به این ترتیب امکان تعیین هم زمان ضریب رسانش گرمایی و ضریب پخش گرما فراهم می‌گردد.

نیکس برای یافتن ضریب پخش گرما از یک سری نامتناهی به صورت زیر استفاده نمود [Opoku et al., 2006]:

$$T = \frac{Q}{2\pi k} \left(\frac{-Ce}{2} - \ln \beta - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n (\beta)^{2n}}{(2n)(n!)} \right) \quad (9)$$

که: Ce ثابت اولر برابر 0.5772157 ، n عدد صحیح و مثبت و β نیز عددی بدون بعد برابر با $r/2(\alpha t)^{0.5}$ است. نیکس و همکاران در سال 1969 نشان دادند که ارزیابی 40 جمله اول از معادله 9 برای اطمینان از همگراشدن سری کفایت می‌نماید. آنها به کمک رایانه از روش عددی نیوتن-رافسون رابطه 9 را تا توان پنجاه ($n=25$) برای β محاسبه نمودند. مزیت استفاده از روش فوق خصوصاً برای مواد بیولوژیک کوتاه بودن زمان آزمایش و کوچک بودن تغییر دما در نمونه می باشد [Mohsenin, 1980]. سیوتر و همکاران ضریب پخش گرما را برای مغز، پوست و غلاف بادام زمینی بر حسب دما از این روش تعیین نمودند [Suter et al., 1975].

وسیله دیگری برای اندازه گیری ضریب پخش گرمای مواد غذایی توسط دیکرسون در سال 1965 ارائه گردید [Singh, 1982]. این وسیله از یک حمام (حوضچه) آب، گرم کن الکتریکی و همزن تشکیل شده است. نمونه مورد آزمایش درون استوانه‌ای با رسانش گرمایی بالا پر شده و درون آب حوضچه مستغرق می گردد. دمای نمونه توسط ترموکوپل‌هایی که به دیواره استوانه نصب شده‌اند (در شعاع R) اندازه‌گیری و ثبت می‌گردد. یک کاوشگر حرارتی نازک در وسط نمونه (مرکز استوانه) قرار داده شده و دمای مرکز نمونه را نشان می دهد. قسمت فوقانی و تحتانی استوانه توسط قطعاتی از جنس تفلون با ضریب پخش گرمای 0.00417 فوت مربع بر ساعت حمایت می‌گردد. با شروع آزمایش، دمای مرکز و دیواره سیلندر تا زمانی ثبت می‌گردد که نرخ افزایش دما در هر دو نقطه یکسان گردد. در این حالت ضریب پخش گرمای نمونه با استفاده از رابطه زیر تعیین می گردد [Mohsenin, 1980]:

$$\alpha = \frac{Ar^2}{4(T_s - T_c)} \quad (10)$$

که در این رابطه A نرخ ثابت افزایش دما (در هر کدام از نقاط)، r شعاع استوانه و $(T_s - T_c)$ تفاوت دمای بین سطح استوانه و مرکز آن می‌باشد.

روش‌های دیگری از جمله استفاده از منحنی های نفوذ گرما توسط سایر پژوهشگران جهت تعیین ضریب پخش گرما در محصولات کشاورزی و مواد غذایی مورد استفاده قرار گرفته است [Singh, 1982].

مواد و روش‌ها

درحالی‌که اندازه‌گیری ضریب رسانش گرمایی، توسط کاوشگر و با قرار دادن آن درون توده م واد (با رعایت حداقل ابعاد مورد نظر) امکان‌پذیر می‌باشد، اندازه‌گیری ضریب پخش گرمای م واد مستلزم اندازه‌گیری و ثبت تغییرات دما درون توده مواد (در فاصله معینی از کاوشگر) می‌باشد. به همین دلیل طراحی و ساخت استوانه‌ای که محصول مورد آزمایش درون آن قرار گرفته و کاوشگر در مرکز آن نصب گردد مورد نظر قرار گرفت (شکل 1). نکته‌ای که در تعیین ابعاد استوانه مورد نظر حائز اهمیت می باشد آن است که قطر استوانه حداقل به میزانی باشد که در طی مدت آزمایش شار گرمایی ناشی از منبع خط گرما (درون کاوشگر) به مرزهای آن نرسد چرا که با رسیدن شار گرما به مرزهای استوانه و رخداد انتقال گرما از مرزهای استوانه به محیط بیرون، دیگر تنها شاهد انتقال گرما از روش رسانش نخواهیم بود بلکه روش همرفت نیز در امر انتقال گرما دخیل گردید و نتایج به دست آمده نشان دهنده

ضریب رسانش گرمایی نخواهد بود. به همین دلیل با انجام چند آزمایش مقدماتی مشاهده گردید که با استوانه ای به قطر 25 سانتی متر در مدت زمان آزمایش (حداکثر 10 دقیقه) شار گرمای تولید شده به مرزهای نمونه (دیواره استوانه) نرسیده و افزایش دما در این نقطه مشاهده نمی گردد. چنانچه از رابطه پیشنهادی وس³ (1955) نیز استفاده گردد مشاهده خواهد شد که نسبت $4\alpha\theta/d^2$ برابر با 0/04 می گردد که از حداکثر مقدار مجاز آن (0/6) خیلی کوچک تر می باشد.



شکل 1: کاوشگر ضریب رسانش گرمایی نصب شده در مرکز استوانه

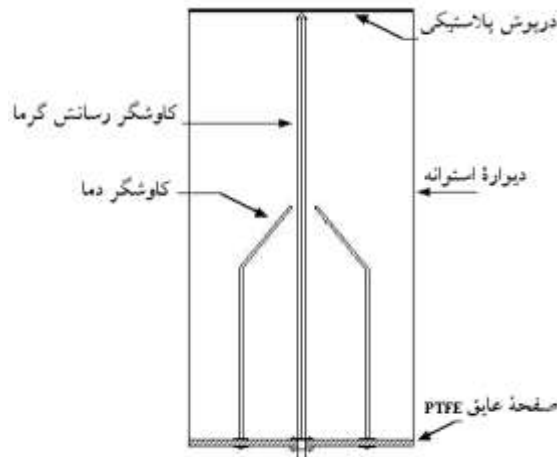
الف - نمای بالای استوانه، ب - نمای کف استوانه

استوانه از پایین به ضخامت 1cm توسط صفحه ای از جنس PTFE⁴ و از بالا توسط درپوش پلاستیکی عایق گردید تا از عدم ایجاد شار گرمایی محوری اطمینان حاصل گردد. دو کاوشگر دما⁵ شامل حسگر دمایی RTD (مشابه حسگر مورد استفاده در کاوشگر ضریب رسانش گرمایی) به گونه ای درون استوانه نصب گردید که بتوانند دمای محصول را در فواصل معین از بدنه کاوشگر اندازه گیری نمایند. این کاوشگرها نیز از جنس فولاد ساخته شده و روی صفحه پایینی (کف استوانه) نصب گردیدند (شکل 1). جهت اندازه گیری و ثبت دما یکی از حسگرها به سامانه اخذ داده ها متصل گردید. خروجی کانال مذکور از طریق پورت RS-232 به کامپیوتر منتقل گردیده و توسط نرم افزار مربوطه، داده های این حسگر نیز در آرایه های دوتایی (زمان-دما) ثبت گردیدند که قابل توجه این است که عملاً شروع گرم شدن در این نقطه پس از گذشت دوره زمانی خاصی از لحظه روشن شدن کاوشگر اتفاق می افتد. همانگونه که در بالا بیان گردید با نصب حسگر (های) دما در درون استوانه آزمایش (درون توده محصول) امکان اندازه گیری همزمان ضریب پخش گرما و ضریب رسانش گرمایی فراهم گردید. برای اندازه گیری همزمان ضریب پخش گرما از روش سعی و خطا، لازم است ابتدا با حدس ضریب پخش گرما، β که عددی بدون بعد می باشد ضمن جایگذاری r (فاصله نوک کاوشگر دما تا بدنه کاوشگر ضریب رسانش گرمایی) برای زمان خاصی تعیین گردد. سپس برای مقادیر $0/16 < \beta < 3/1$ با جایگذاری مقادیر k و Q در رابطه (9) تخمیری از T بدست می آید.

³ Vos

⁴ PolyTetraFluoroEthylene

⁵ Temperature probe



شکل 3-8: استوانه اندازه گیری هم زمان ضریب رسانش گرمایی و ضریب پخش گرما

با مقایسه مقدار T بدست آمده با مقدار واقعی T (دمای ثبت شده توسط کاوشگر دما) در لحظه مورد نظر نسبت به انجام یک حدس جدید برای مقدار α و تکرار محاسبات بالا اقدام می گردد. مراحل فوق تا زمانی که به مقدار واقعی α از روش سعی و خطا دست یابیم ادامه می یابد. چنانچه از دو یا چند کاوشگر دمای درون توده محصول استفاده گردد، لازم است ضمن پایش این امر که همه آنها باید از کاوشگر ضریب رسانش گرمایی فاصله یکسانی داشته باشند؛ از مقادیر دمای ثبت شده متناظر با کاوشگرهای دما میانگین گیری نموده و از این مقدار میانگین در محاسبات مربوط استفاده شود.

نکته دیگری که ضمن انجام مراحل روش سعی و خطا باید مورد توجه و پایش قرار گیرد، مناسب بودن فاصله r (فاصله نوک کاوشگر یا کاوشگرهای دما تا بدنه کاوشگر ضریب رسانش گرمایی) می باشد. چنانچه مقدار β در بازه مورد پذیرش ($0/16 < \beta < 3/1$) قرار نگیرد، لازم است قبل از آزمایش مجدد، مقدار r به نحوی تغییر یابد که β در این بازه و یا ترجیحاً بین مقادیر $0/2 < \beta < 0/5$ قرار گیرد. لازم بذکر است مقدار α برای هر آزمایش با اندازه گیری ضریب پخش گرما در چند زمان و میانگین گیری از مقادیر به دست آمده تعیین می گردد.

در پژوهش حاضر به جای استفاده از روش سعی و خطا از روش های عددی جهت تعیین ضریب پخش گرما استفاده گردید و تنها یک مرتبه مراحل روش سعی و خطا برای تأیید صحت مقدار β و تصحیح r مورد استفاده قرار گرفت. پس از تصحیح مقدار r ، مقدار β با جایگذاری مقادیر k ، Q و T در رابطه (2-45) و با استفاده از ابزار Solver (از ابزارهای نرم افزار میکروسافت اکسل) بدست آمد. از مقادیر مندرج در برنامه رایانه ای که توسط نرم افزار MATLAB toolbox ver 4.2c برای حل عددی رابطه (9) از روش نیوتن رافسون، برای تعیین مقدار β تا $n=30$ نوشته شده استفاده گردید.

نتایج و بحث

برای اندازه گیری ضریب پخش گرمایی قرص خوراک دام لازم است مقدار β با استفاده از مقادیر به دست آمده T و k و با جایگذاری مقدار Q در رابطه (9) تعیین گردد. از آنجا که رابطه (9) شامل یک سری نامتناهی می باشد،

⁶ Microsoft Excel

روش‌های عددی برای حل این رابطه مورد استفاده قرار گرفت. نیکس و همکاران در 1969 نشان دادند که ارزیابی 40 جمله اول از معادله (8) برای اطمینان از همگرا شدن سری کفایت می‌نماید. آنها به کمک رایانه از روش عددی نیوتن-رافسون سری را تا توان پنجاه ($n=25$) برای β محاسبه نمودند. رابطه (9) با استفاده از ابزار Solver (از ابزارهای MS Excel) بدست آمد. از مقادیر مندرج در برنامه رایانه‌ای که توسط نرم‌افزار MATLAB برای حل عددی رابطه (9) از روش نیوتن رافسون، برای تعیین مقدار β تا $n=30$ هشته شده استفاده گردید. در برنامه نوشته شده فوق (در ابزار Solver) با جایگذاری مقادیر بدست آمده یا محاسبه شده k ، T و Q و با حدس اولیه برای مقدار β ، رابطه (9) بر حسب مقدار β حل گردید. پس از تعیین مقدار β ، ضریب پخش گرما با توجه به رابطه بین پارامتر β و ضریب پخش گرما محاسبه گردید (مقدار r برابر با 0.02 m). نهایتاً مقدار ضریب پخش گرمای محصول با میانگین گیری از مقادیر بدست آمده برای α در سه زمان (150، 250 و 350 ثانیه) تعیین گردید.

قدردانی

نگارندگان بر خود لازم می‌دانند از مساعدت همکاران موسسه آموزش عالی علمی کاربردی جهاد کشاورزی و شرکت خوراک دام پارس تقدیر نمایند.

منابع

- ASAE Standards. 2002. Cubes, Pellets, and Crumbles – Definitions and Methods for Determining Density. Am. Soc. Agric. Eng. Standard S269.4. p 563.
- Behnke, K.C. 1996. Feed Manufacturing Technology: Current Issues and Challenges. Anim. Feed Sci. Technol. 62:49-57.
- Bhadra, R., Muthukumarappan, K., and Rosentrater, K.A. 2010. Effects of Varying CDS Levels and Drying and Cooling Temperatures on Flowability Properties of DDGS. ASABE paper No. 1008604. St. Joseph, ASABE
- Gilpin, A. S., Herrman, T. J., Behnke, K. C. and Fairchild, F. J. 2002. Feed Moisture, Retention Time, and Steam as Quality and Energy Utilization Determinants in the Pelleting Process. Appl. Eng. Agr. 18: 331–338
- Kannadhasan, S., Muthukumarappan, K., and Rosentrater, K.A. 2008. Effects of Ingredients and Extrusion Parameters on Aquafeeds. J. of Aquaculture Feed Science and Nutrition. 11:6-21.
- Suter, D.A., K.K. Agrawal, and Clary, B.L. 1975. Thermal Properties of Peanut Pods, Hulls and Kernels. Trans. ASAE, 18: 370-375.
- Opoku, A, L.G. Tabil, B. Crerar and M.D. Shaw. (2006). Thermal conductivity and thermal diffusivity of timothy hay. Canadian Biosystems Engineering, 48:3.1-3.7
- Singh, R.P. (1982). Thermal diffusivity in food processing. Food Technology, 36:87.