مجله دانش کشاورزی/ جلد 18 شماره 1/ سال 1387 / صفحه‌های 227-215

ضريب رسانش گرماي توده در پستة پوست‌گيري نشده

احمد صادقي[1*]، تيمور توكلي[2]، برات قباديان[2]، محمدهادي خوش‌تقاضا[2] و سعيد مينايي[2]

تاريخ پذيرش:86/9/24

1- موسسه آموزش عالي علمي كاربردي وزارت جهاد كشاورزي
2- گروه ماشين‌هاي كشاورزي دانشكده كشاورزي دانشگاه تربيت مدرس
*مسئول مكاتبه E-mail: sadeghi@itvhe.ac.ir

چكيده
يكي از مهم‌ترين خواص حرارتي تودة پسته پوست‌گيري نشده يعني ضريب رسانش گرما به عنوان تابعي از دما و رطوبت مورد ارزيابي قرار گرفت. بازة رطوبتي دانه‌ها از 20/9% بر پاية وزن تر تا 51/8% (رطوبت هنگام برداشت) و بازة دمايي از 20 تا 40 درجه سلسيوس متغير بود. به منظور اندازه‌گيري ضريب رسانش گرما در مواد كشاورزي نسبت به ساخت كاوشگر رسانش گرما اقدام گرديد. با استفاده از كاوشگر مذكور كه يك منبع خط گرما درون آن نصب گرديده است ضريب رسانش گرما در حالت گذرا ضمن محاسبة شيب لحظه‌اي بيشينه تعيين گرديد. ضريب رسانش گرما با افزايش رطوبت و دما به طور معني‌داري افزايش يافت به گونه‌اي كه با افزايش رطوبت از 20/9% به 51/8% ، اين ضريب به طور متوسط از0/1145 به 0/1904 W/m°C افزايش يافت. علاوه بر آن مشاهده گرديد كه با افزايش دما از 20 تا 40 درجه سلسيوس متوسط ضريب رسانش گرما از حداقل 0/1448 تا حداكثر 0/1585 W/m°C متغير بود. آزمايش‌ها روي دو رقم پسته (رقم اكبري و رقم كله‌قوچي) نشان داد كه ضريب رسانش گرما در پستة رقم كله‌قوچي در سطح احتمال 5% كوچكتر از رقم اكبري مي‌باشد. برخي روابط رگرسيوني درجة دو از اثرات دما و رطوبت بر ضريب رسانش گرما ارائه گرديد.

واژه‌هاي كليدي: پستة پوست‌گيري نشده، روش منبع خط گرما، ضريب رسانش گرما، كاوشگر رسانش گرما

Bulk Thermal Conductivity of Unhulled Pistachio Nuts

A Sadeghi[1*], T Tavakoli[2], B Ghobadian[2], MH Khoshtaghaza[2] and S Minaei[2]

[1]Institute of Technical & Vocational Higher Education of Jihad Keshavarzi, Tehran, Iran
[2]Department of Agricultural Machinery, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
*Corresponding author: E-mail: sadeghi@itvhe.ac.ir

Abstract

One of the most important thermal properties of unhulled pistachio nuts, namely bulk thermal coductivity, was evaluated as the function of moisture content and temperature. The moisture content of nuts ranged from 20.9% on the wet basis to 51.8% (moisture content at harvest time) and the temperature ranged from +20°C to +40°C. In order to measure the thermal conductivity of agricultural materials, a specific probe was developed. Thermal conductivity was measured in transient state by calculating the maximum instant slope, using the line heat source which was assembled in the probe. Bulk thermal conductivity varied significantly with moisture content and temperature. It ranged from 0.1145 to 0.1904 W/mK and increased with moisture content in the range of 20.9-51.8% on the wet basis. Furthermore, increasing the temperature from 20 to 40°C raised the average thermal conductivity from 0.1448 to 0.1585 W/mK. The conducted tests on two varieties of nuts (Akbari and Kallehghoochi) demonstrated that the thermal conductivity of Kallehghoochi cultivar is lower than that of the Akbari cultivar at α=0.05. Quadratic regression equations were developed depicting the effect of moisture content and temperature on thermal conductivity.

Key Words: Line heat source method, Thermal conductivity, Thermal conductivity probe, Unhulled pistachio nuts

مقدمه

کاشت و پرورش درخت پسته (*Pistacia vera* L.) در ایران سابقه‌اي طولاني دارد. سطح زیر کشت محصول پسته طي 25 سال گذشته از افزايش چشمگيري برخوردار بوده، به نحوي كه سطح زير كشت پسته از 62 هزار هكتار در سال 1357 به 420 هزار هكتار در سال 1382 رسيده است (بي‌نام 1383). محصول پسته (مانند بيشتر محصولات زراعي و باغي) طي فرآوري و حين انجام عملياتي چون نگهداري قبل از پوست‌گيري، خشك كردن، نگهداري پس از فرآوري و برشته كردن مورد فعاليت‌هايي كه متضمن كاهش يا افزايش دما باشد قرار مي‌گيرد. شناخت خواص حرارتي و فيزيكي محصول مي‌تواند در طراحي سيستم‌ها و تجهيزات مناسب براي فرايندهاي فوق‌الذكر نقش اساسي داشته باشد. همچنين تجزيه و تحليل اينگونه فرايندها مستلزم دانش كافي از خواص حرارتي مي‌باشد. ضريب رسانش گرما[1] كه خاصيتي انتقالي است، معياري از نرخ انتقال گرما در اثر فرايند پخش مي‌باشد (توكلي هشجين 1382). در واقع در اثر وجود گراديان دما، شار گرمايي از ناحية با دماي بالاتر به ناحية با دماي پايين‌تر به وجود مي‌آيد. روش‌هاي اندازه‌گيري ضريب رسانش گرما را مي‌توان به دو گروه تقسيم‌بندي نمود: روش‌هايي كه متضمن حالت پاياي انتقال گرما (شرايط دائم[2]) هستند و روش‌هايي كه از حالت گذراي[3] انتقال گرما براي اندازه‌گيري اين خاصيت بهره مي‌جويند. روش‌هاي حالت پايا عموماً براي مواد غيربيولوژيكي كاربرد دارد. براي محصولات كشاورزي و مواد غذايي كه عموماً داراي ساختار سلولي و محتواي رطوبتي بالا هستند، استفاده از روش‌هاي حالت پايا منجر به وقوع پديدة انتقال رطوبت مي‌گردد و اين امر باعث ايجاد خطا در اندازه‌گيري خواص حرارتي اين مواد مي‌شود. محققان قبلاً براي اندازه‌گيري خواص حرارتي محصولات كشاورزي از روش انتقال گرماي يك بعدي پايا استفاده كرده‌اند (محسنين 1980).

روش چشمه خطي گرما[4] يكي از متداول‌ترين روش‌هاي حالت ناپايا (گذرا) بوده و در مقايسه با ديگر روش‌هاي اندازه‌گيري، غالباً اين روش از دقت خوب و نتايج مشابه برخوردار بوده است (يانگ و همكاران 2002). در اين روش از يك سيم مقاومت‌دار بدون

[1] Thermal conductivity

[2] Steady state

[3] Transient state

[4] Line heat source method

پوشش يا از يك كاوشگر رسانش گرما[1] كه سيمي مقاومت‌دار درون آن تعبيه شده استفاده مي‌گردد. كاوشگر رسانش گرما يك استوانة بلند و كم قطر از ماده‌اي با رسانش گرمايي خوب مي‌باشد. اين استوانه مي‌تواند توپر بوده و قطر كمي داشته باشد (مانند يك سوزن) و يا توخالي بوده و ديوارة نازكي داشته باشد. در هر دو صورت فوق تفاوت دما در پوستة كاوشگر به دليل رسانش گرمايي بالاي فلز بدنة كاوشگر و ضخامت ناچيز آن، قابل صرفنظر كردن است. اساس اندازه‌گيري ضريب رسانش گرما به روش منبع خط گرما، قرار گرفتن يك منبع خط گرما با قطر بي‌نهايت كوچك و طول بي‌انتها و حرارت يكنواخت در طول آن درون استوانه‌اي (با ارتفاع بي‌نهايت) از مواد همگن مي‌باشد.

معادلة اصلي براي جريان گرماي ناشي از منبع خط گرما درون نمونه در دستگاه مختصات قطبي به صورت زير است (رستمي 1380):

$$\frac{\partial T}{\partial t}=\alpha\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}\right) \qquad [1]$$

كه در اين معادله T دما (°C)، t زمان (s)، r شعاع (m) و α ضريب پخش گرما (m^2/s) مي‌باشد. معادلة فوق براي دما در فاصلة معيني از منبع گرما (درحالت ناپاياي انتقال گرما) به عنوان تابعي از توان منبع، زمان، فاصله و خواص گرمايي مواد به شكل زير حل گرديده است (سيوتر و همكاران 1975):

$$T=\frac{Q}{2\pi k}\int_{\beta}^{\infty}\frac{\exp(-x^2)dx}{x} \qquad [2]$$

در اين معادله Q توان منبع در واحد طول (وات بر متر)، β مقداري بي بعد و برابر: $\beta={r}/{2\sqrt{\alpha t}}$ و x متغير رابطه است. اين معادله تبديل به يك سري نامتناهي مي‌گردد (يانگ و همكاران 2002):

$$T-T_0=\frac{q}{2\pi k}F(rn) \qquad [3]$$

در معادله بالا T_0 دماي اولية نمونه و n يك متغير مياني بوده و:

$$F(rn)=A-\ln(rn)+\frac{(rn)^2}{2}+\frac{(rn)^4}{8}+\cdots \qquad [4]$$

$$n=\frac{1}{2}(\alpha t)^{-1/2} \qquad [5]$$

كه در اين روابط A يك عدد ثابت مي‌باشد. چنانچه حاصلضرب rn خيلي كوچك باشد (r خيلي كوچك و قابل صرف‌نظر براي مقادير بزرگ n يا t) آنگاه معادلة 4 را مي‌توان توسط اولين دو جملة سري تقريب زد و معادلة 3 به صورت زير در مي‌آيد (ساباپاتي و تبيل 2003):

$$T-T_0=\frac{q}{2\pi k}\left[A-\ln(rn)\right] \qquad [6]$$

$$T-T_0=\frac{qA}{2\pi k}-\frac{q}{2\pi k}\ln\left(\frac{1}{2}r\alpha^{-1/2}\right)+\frac{q}{4\pi k}\ln(t) \qquad [7]$$

معادلة 7 يك رابطة خطي بين $(T-T_0)$ و $ln(t)$ را با ضريب زاوية $S=\frac{Q}{4\pi k}$ نشان مي‌دهد. ضريب زاوية S مي‌تواند از رگرسيون خطي بين $(T-T_0)$ در برابر $ln(t)$ بدست آمده، سپس ضريب رسانش گرما از معادلة زير بدست مي‌آيد (فونتانا و همكاران 2001):

$$k=\frac{I^2R}{4\pi S} \qquad [8]$$

كه در اين معادله R مقاومت الكتريكي عنصر گرمايي بر واحد طول (اهم بر متر) و I شدت جريان الكتريكي ورودي به منبع خط گرما (آمپر) مي‌باشد.

به منظور به حساب آوردن و جبران برخي انحرافات شرايط واقعي از مفروضات و شرايط ايده‌آل لازم است عوامل تصحيح و الزامات خاصي از جمله عامل تصحيح زمان[2] (براي جبران اثر جرم، اندازه و شعاع محدود عنصر گرمايي) را در نظر بگيريم. عامل تصحيح زمان (t_0) از زمانهاي ثبت شده كسر گرديده و اثر قطر محدود عنصر گرمايي و هر گونه مقاومت حرارتي بين عنصر گرمايي و نمونه را حداقل مي‌نمايد. با

[1] Thermal conductivity probe

[2] Time correction factor

در نظر گرفتن این عامل تصحیح از معادلة 7 نتیجه مي‌گیریم (محسنین 1980):

$$k=\frac{q}{4\pi}\left[\ln\left(\frac{t_2-t_0}{t_1-t_0}\right)\Big/(T_2-T_1)\right] \quad [9]$$

که در این معادله t_0 عامل تصحیح زمان (بر حسب ثانیه) مي‌باشد. جهت اندازه‌گیري ضریب رسانش گرما، کاوشگر را درون تودة محصول فروبرده (مانند اندازه‌گیري ضریب رسانش گرماي تودة غلات) و یا با ایجاد سوراخي درون جسم مورد نظر کاوشگر را درون جسم قرار مي‌دهیم.

ضریب رسانش گرما براي بسیاري از محصولات کشاورزي و مواد غذایي از جمله براي پسته (هو و همکاران 1991)، بادام زمیني (سیوتر و همکاران 1975)، برنج (راتن و همکاران 1969 و موریتا و سینگ 1979)، کلزا (مویسي و همکاران 1977)، زیرة سبز (سینگ و گوسوامي 2000)، ذرت (کاسترمن و همکاران 1981)، نخود (ساباپاتي و تبیل 2003) و بذرگل‌گاوزبان (یانگ و همکاران 2002) با روش فوق مورد مطالعه قرار گرفته است.

هدف عمده این پژوهش علاوه بر تعیین ضریب رسانش گرما در توده محصول پسته پوست‌گیري نشده و بررسي تغییرات آن با تغییر دما و رطوبت، بررسي اثرات احتمالي رقم بر خاصیت فوق مي‌باشد. همچنین ارائة روابط بین این خاصیت گرمایي در توده پسته پوست‌گیري نشده به عنوان تابعي از دما و رطوبت مورد نظر مي‌باشد.

مواد و روش‌ها

1. روش تهیه و آماده سازي نمونه

براي انجام آزمایش‌هاي مربوط به اندازه‌گیري رسانش گرما و تغییرات آن با دما از دو رقم پستة اکبري و کله‌قوچي استفاده شد. انتخاب دو رقم پستة فوق به این دلیل صورت گرفت که اولاً این دو رقم پسته هرکدام بترتیب از ارقام شاخص پسته‌هاي بادامي شکل (کشیده[1]) و فندقي شکل (گرد[2]) محسوب مي‌گردند و ثانیاً این دو رقم از ارقام مهم تولیدي و صادراتي کشور بشمار مي‌روند. جهت بررسي تغییرات رسانش گرما نسبت به تغییرات محتواي رطوبتي، صرفاً رقم اکبري مورد مطالعه قرار گرفت.

نمونه‌ها مستقیماً از باغ پسته و از توده‌هاي تازه چیده شدة محصول تهیه گردید. محل برداشت نمونه‌ها مزرعة یاسایي واقع در حومة شهر کرمان مي‌باشد. درصد رطوبت اولیة نمونه‌هاي مربوط به هرکدام از دو رقم مورد نظر مطابق روش استاندارد S410.1 (دماي 130±3 درجه سلسیوس و زمان10 ساعت) و بر اساس وزن تر معادل 51/8% اندازه‌گیري شد (بي‌نام 1998). نمونه‌ها براي رسیدن به سطوح رطوبتي پایین‌تر از رطوبت بدو برداشت (42/3%، 35/6%، 27/2% و 20/9% بر پایه وزن تر) درون خشك کن صندوقي با دماي 62 درجه سلسیوس بصورت لایه نازك مورد خشك کردن قرار گرفت. به منظور یکنواخت شدن رطوبت دروني، نمونه‌ها پس از قرار گرفتن درون ظروف پلاستیکي دو جداره به مدت 2 تا 5 روز بصورت در بسته در دماي 4 درجه سلسیوس نگهداري گردیدند. در آزمایشگاه نمونه‌ها جهت رسیدن به دماي مورد نظر (براساس سطوح فاکتور دما) به مدت 6 تا 10 ساعت درون انکوباتور نگهداري گردید. دماهاي مورد نظر براي اندازه‌گیري خواص حرارتي در بازة دماي نگهداري (20 تا 40 درجة سانتي‌گراد) بوده و سطوح 20، 30 و 40 درجه سلسیوس را شامل گردید.

2. طراحي و ساخت کاوشگر ضریب رسانش گرما

یکي از پارامترهاي مهم در طراحي کاوشگر، تعیین ابعاد آن مي‌باشد. در این مورد علي‌رغم محدودیت‌هاي عملي، کاوشگر باید به‌گونه‌اي طراحي گردد که نسبت طول کاوشگر به قطر آن (L/d) در حدي باشد که جریان

[1] Long
[2] Round

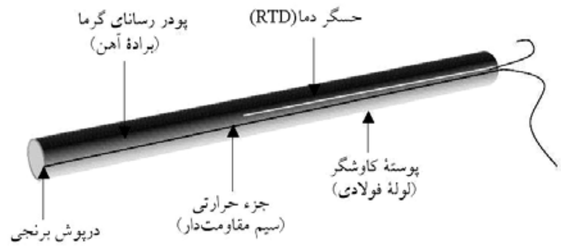
گرمـا شـعاعي بـوده و جريـان محـوري گرمـا قابـل صرف‌نظر باشد. با توجه به قطر عنصر گرمايي، حـسگر دما و سيم‌هاي رابط از يك استوانة توخـالي فـولادي بـه قطر خارجي 8 ميلي‌متر و ضـخامت ديـوارة 1 ميلـي‌متـر براي ساخت كاوشگر استفاده گرديد. بـا در نظـر گـرفتن طـول كاوشـگر (56 سـانتي‌متـر) نـسبت طـول بـه قطـر كاوشگر معادل 70 تعيين گرديد كه با توجـه بـه توصـية محققان كه حداقل اين نسبت را بين 25 تـا 100 پيـشنهاد مي‌نمايند، مقدار مناسـبي مـي‌باشـد. بـه‌منظـور محاسـبة حداكثر خطاي ناشي از جريان محـوري گرمـا از معادلـة زير استفاده گرديد (محسنين 1980):

$$(\Delta R)_{max} = \left[5.64/\lambda + 6.8\times10^{-3}\,\sigma\lambda(\varepsilon-\eta)\right]\cdot e^{-0.01\lambda^2} \qquad [10]$$

كه در اين رابطه $(\Delta R)_{max}$ حداكثر خطاي نسبي، λ نسبت طول كاوشگر به قطـر بيرونـي آن (L/d)، σ چهـار برابـر ضخامت ديوارة كاوشگر تقسيم بـر قطـر بيرونـي بـراي كاوشـگرهاي تـو خـالي و معـادل 1 بـراي كاوشـگرهاي توپر، ε نسبت ضريب رسانش گرمايي بدنة كاوشـگر بـه ضـريب رسـانش گرمـايي محـصول (k_1/k_2) و η نـسبت ضريب رسـانش گرمـايي بـه ضـريب پخـش گرمـا بدنـة كاوشگر(k_1/α_1) به نـسبت ضـريب رسـانش گرمـايي بـه ضريب پخش گرماي نمونه (k_2/α_2) مي‌باشد.با جايگذاري نـــسبت $(L/d)=70$ ، $\sigma=0/5$ ، $\varepsilon=70$ و $\eta=5/25$ حـــداكثر خطاي ناشي از وجـود جريـان محـوري گرمـا برابـر بـا $(\Delta R)_{max} < \%(1\times10^{-18})$ محاسـبه گرديـد كـه بـسيار كوچك و قابل صرف‌نظر مي‌باشـد و ايـن امـر دليلـي بـر انتخـاب صـحيح ابعـاد كاوشـگر مـي‌باشـد. از يـك سـيم مقاومت‌دار كروم نيكل به قطر 0/7 ميلي‌متـر بـا مقاومـت 26/67 اهم بر متـر بـه عنـوان عنـصر گرمـايي اسـتفاده گرديد. اين سيم در حالي‌كه توسط پوششي از يـك لايـه لاك سـلولوزي عـايق گرديـده بـود در مركـز كاوشـگر به‌گونه‌اي جايگذاري گرديد كه عنـصر گرمـايي از طـرف نوك كاوشگر توسط يك پولك فلـزي بـه بدنـة كاوشـگر متصل شـده و از انتهـاي كاوشـگر توسـط پـيچ و مهـره قابليــت تنظــيم كــشش را دارا مــي‌باشــد. بــه‌منظــور اندازه‌گيري دماي خط مركزي گرما (عنصر گرمايي)، يك حـسگر دمـايي از نـوع RTD[1] سـاخت شـركت JUMO آلمان در ميانة طول كاوشگر درون آن نصب گرديد. اين حسگر كه از نوع فيلم نازك[2] و از جنس پلاتينيوم ساخته شده، در دماي صفر درجه سلسيوس مقاومتي در حدود 100 اهم از خود نشان مي‌دهد و به ايـن‌جهـت بـا عنـوان PT100 شناخته مي‌شود. عنصر گرمـايي و حـسگر دمـا در ميانة طولي كاوشـگر عمـلاً بـا هـم ممـاس گرديـده و حسگر، دماي عنصر گرمايي را بـا حـداقل تـأخير زمـاني اندازه‌گيري مي‌نمايد. از يك قطعة برنجي مخروطي شـكل به عنوان درپوش نوك كاوشگر استفاده گرديد. براي كـم كردن ضـريب تـصحيح زمـاني كاوشـگر فـضاي داخلـي استوانة كاوشگر توسط مواد پودري با ضريب رسـانش گرمايي بالا (بـرادة نـرم آهـن) پـر گرديـد. بـا توجـه بـه ضريب رسـانش گرمـايي بـالاي فلـزات خـصوصاً آهـن، گرماي توليد شده توسط عنصر گرمايي در حداقل زمـان ممكـن بـه ديـوارة كاوشـگر و متعاقبـاً بـه نمونـة مـورد آزمايش منتقـل مـي‌گـردد. در شـكل 1 اجـزاي كاوشـگر ضريب رسانش گرما نشان داده شده است.

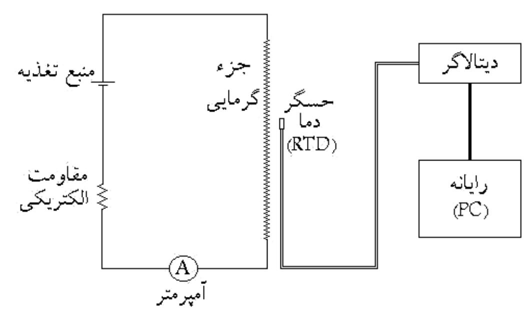
از يـك منبـع تغذيـة جريـان مـستقيم (DC) بـا ولتاژ 12 ولت براي گرم كردن عنصر گرمايي استفاده گرديد. جهت محدود نمودن آمپر مصرفي توسط خـط گرما، عنصر گرمايي را با يك مقاومت 12 اهمي بطور سري قرار داده و جريان مصرفي توسط يك دسـتگاه مولتي‌متر ديجيتال مدل DM-9027T سـاخت شـركت لوترون تايوان اندازه‌گيري شد. ايـن دسـتگاه مقاومـت را بـا حـساسيت 0/01 اهـم و جريـان الكتريكـي را بـا حـساسيت 1 ميلـي آمپـر (در بـازة انـدازه‌گيـري‌هـاي انجام شده در ايـن پـژوهش) انـدازه‌گيـري مـي‌نمايـد. جهت اندازه‌گيري و ثبت دماي خط گرما توسط حسگر دمــاي اشـاره شـده در بالا، از يك سيـستم ديتـالاگر

---
[1] Resistance temperature detector
[2] Thin film



شکل**1**- اجزا و ساختار کاوشگر رسانش گرما

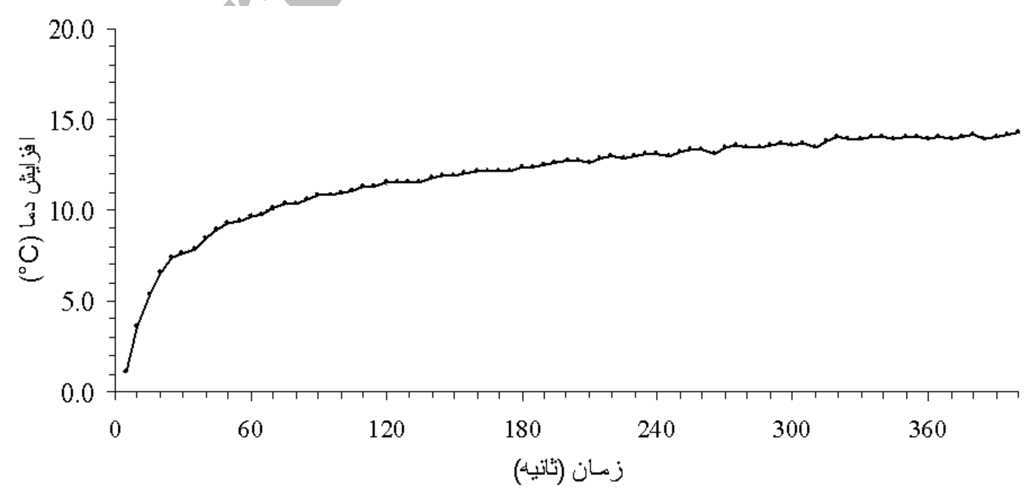
(Kasra Electronics Inc.) اسـتفاده شـد. ایـن دستگاه جهت کار با RTDها طراحي و ساخته شده و خروجي آن توسط پورت RS-232 بـه کـامپيوتر منتقـل گرديده و توسط نرم‌افزار مربوطه، داده‌ها در آرايه‌هـاي دوتايي (زمان- دما) ثبت گرديد. ايـن نـرم‌افـزار توانـايي رسم نمودار تغييـرات دمـا در مقابـل زمـان را نيـز دارا مي‌باشد (شكل2).



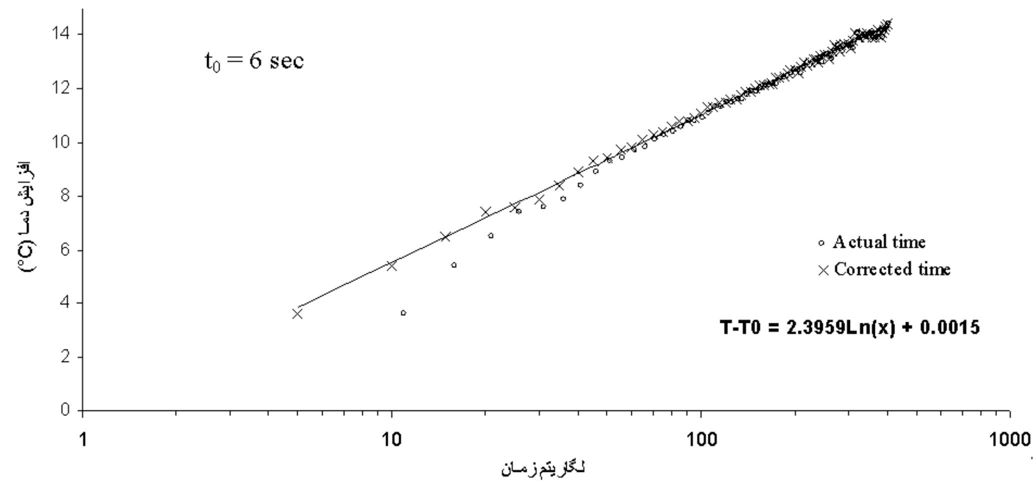
شكل**2**- مدار الكتريكي و اندازه‌گيري كاوشگر رسانش گرما

3. تعیین ضریب تصحیح زمان کاوشگر رسانش گرما

همانگونـه كـه قـبلا بيـان گرديـد لازم اسـت ضـريب تـصحيح زمـان بـه‌منظـور بـه‌حـساب آوردن و جبـران انحرافات شرايط واقعي از مفروضـات و شـرايط ايـده‌ال روش منبع خط گرما، تعيين و اعمال گردد. جهـت تعيـين ضريب تصحيح زمان، در ابتدا نمودار تغييـرات دمـا (T) در برابر زمان (t) رسم گرديد (شكل3). سپس بـا بدسـت آوردن شيب لحظـه‌اي در چنـد نقطـه از ايـن نمـودار (در زمان‌هاي آغـازين آزمـايش)، نمـودار dt/dT در برابـر t رسم گرديد. بـا گذرانـدن بهتـرين خـط مـستقيم از نقـاط روي نمودارفوق، محل تقاطع ايـن خـط بـا محـور زمـان تعيين شده و به عنـوان ضـريب تـصحيح زمـان در نظـر گرفته شد (شكل4). همانگونه كه در شكل فـوق مـشاهده مي‌گردد نمودار تغييرات دماي منبع خـط گرمـا در برابـر لگاريتم زمان پس از اعمال ضريب تصحيح فوق تبديل به يك خط راست مي‌گردد. خطي بودن اين نمودار از اصول اساسي روش منبع خط گرما مي‌باشد.



شكل**3**- تغييرات دماي عنصر گرمايي در برابر زمان (اولين مرحلة تعيين ضريب تصحيح زماني كاوشگر رسانش گرما)



شكل4- تغييرات دما در برابر لگاريتم زمان (براي داده‌ها قبل و بعد از اعمال ضريب تصحيح زمان)

4. روش تعيين و اندازه‌گيري ضريب رسانش گرما

اندازه‌گيري ضريب رسانش گرما به صورت دو آزمايش فاكتوريل و در قالب طرح كاملاً تصادفي انجام گرديد. در آزمايش اول عوامل دما (شامل سه سطح) و رقم (شامل دو سطح) و در آزمايش دوم عوامل دما (شامل سه سطح) و محتواي رطوبتي (شامل پنج سطح) در نظر گرفته شد. تيمارهاي هر دو آزمايش در سه تكرار بررسي شدند. آزمايش اول براي دو رقم پستة مورد نظر، با توجه به تيمارها و تكرارهاي مورد نظر براي هركدام از ارقام مشتمل بر 18 واحد آزمايشي و آزمايش دوم نيز با توجه به تيمارها و تكرارهاي مورد نظرمشتمل بر45 واحد آزمايشي طراحي گرديد. با قرار گرفتن نمونه (با سطوح معين فاكتورهاي دما، رطوبت يا رقم) درون استوانه پيرامون كاوشگر و پس از قرار دادن درپوش استوانه، جريان الكتريكي در مدار كاوشگر برقرار گرديد. نرخ گرم شدن عنصر گرمايي توسط حسگر نصب شده درون كاوشگر اندازه‌گيري و ثبت شد. اندازه‌گيري دما در حدود 6 دقيقه ادامه يافته و در هر ثانيه يك‌بار دماي عنصر گرمايي اندازه‌گيري و به همراه زمان متناظر توسط نرم‌افزار KDI-RTD2 در رايانه ثبت گرديد. جهت تعيين ضريب رسانش گرماي محصول، ابتدا ضريب تصحيح زمان بدست آمد. سپس اين ضريب از تمام اعداد مربوط به زمان (در آرايه‌هاي دوتايي زمان-دما) كسر شد. آنگاه نمودار تغييرات دما بر حسب لگاريتم زمان رسم گرديد. از آنجاكه زمان‌هاي بكار رفته در رسم اين نمودار تصحيح شده مي‌باشند، اين نمودار به صورت خطي ظاهر مي‌گردد. با استفاده از نمودار رسم شده (يا داده‌هاي مربوطه) شيب اين خط محاسبه شده و متعاقباً ضريب رسانش گرماي محصول با استفاده از معادلة 8 تعيين گرديد.

نتايج و بحث

مقادير محاسبه شدة ضريب رسانش گرما در سطوح فاكتورهاي دما و رقم مورد تجزية واريانس قرار گرفت (جدول1). بر اساس نتايج حاصل از تجزية واريانس، تغييرات عوامل دما و رقم بترتيب در سطوح احتمال 1% و 5% داراي اثر معني‌دار بر ضريب رسانش گرما مي‌باشند و اين در حالي است كه اثر متقابل دو فاكتور فوق (رقم × دما) روي اين ضريب معني‌دار نگرديد.

جدول**1**- تجزيه واريانس مقادير ضريب رسانش گرماي ارقام پسته پوست‌گيري نشده در دماهاي مختلف

منابع تغيير	درجه آزادي	ميانگين مربعات (10^{-4})	F
رقم	1	0/209	7/04*
دما	2	6/536	220/11**
رقم × دما	2	0/024	0/82
خطا	12	0/030	

* و ** به تريب معني‌دار در سطح احتمال **5**% و **1**%

مقايسة ميانگين توسط آزمون کمترين اختلاف معني‌دار (LSD) در سطح احتمال 5% نشان داد که با افزايش دما از 20 به 30 درجه سلسيوس و از 30 به 40 درجه سلسيوس ميانگين ضريب رسانش گرماي ارقام مورد پژوهش افزايش يافته و از اختلاف معني‌داري نسبت به سطوح قبلي دما برخوردار گرديد (جدول 2). افزايش ضريب رسانش گرما با افزايش دما براي دانه سويا، نخود، کلزا و بادام‌زميني گزارش گرديده است (جاسانسکي و بيلانسکي 1973، سيوتر و همکاران 1975، مويسي و همکاران 1977 و ساباپاتي و تبيل 2003). بررسي‌هاي مشابه در خصوص بذر زيرة سبز[1] و گل گاوزبان[2] نيز افزايش ضريب رسانش گرما در اثر افزايش دما را نشان داده است (سينگ و گوسوامي 2000 و يانگ و همکاران 2002).

گرچه گزارش‌هايي در خصوص کاهش ضريب رسانش گرما با افزايش دما در محصولاتي چون سيب‌زميني و چغندر قند (با محتواي رطوبتي بالا) در دست مي‌باشد ولي با توجه به افزايش ضريب رسانش گرماي آب با افزايش دما، تغييرات اين ضريب در خصوص موادي که داراي رطوبت زيادي هستند بايد بررسي گردد (توکلي هشجين 1382).

بيشترين ضريب رسانش گرما معادل W/m°C 0/1993 مربوط به پستة اکبري در دماي 40 درجه سلسيوس و کمترين مقدار ضريب رسانش گرما مربوط به پستة کله قوچي در دماي 20 درجه سلسيوس و معادل W/m°C 0/1769 مي‌باشد. به طور متوسط (براي دو رقم) ضريب رسانش گرما افزايشي معادل 7% و 11/6% بترتيب به ازاي تغيير دما از 20 به 30 و 40 درجه سلسيوس از خود نشان داد. با توجه به ماهيت پديدة انتقال گرما از طريق رسانش مي‌توان دليل چنين افزايشي در ضريب رسانش گرما را توضيح داد. بر اين اساس علاوه بر ارتعاشات شبکه‌اي، وجود الکترونهاي آزاد نيز در امر رسانش گرما در پديدة انتقال گرما از طريق رسانش دخيل مي‌باشند. با تغيير دما از سطوح پايين به سطوح بالاتر تعداد الکترونهاي آزاد درون ماده افزايش يافته و در اثر اين افزايش توانايي ماده جهت رسانش گرما تشديد مي‌گردد.

با توجه به نتايج تجزية واريانس و معني‌دار شدن اثر رقم مشاهده مي‌گردد متوسط ضريب رسانش گرما در پسته رقم اکبري بزرگتر از ضريب رسانش گرما در پسته رقم کله‌قوچي است که اين اختلاف در سطح احتمال 5% معني‌دار مي‌باشد در هر سطح ده سي نيز اين ضريب براي اکبري بيشتر از کله قوچي بود. دلايل احتمالي براي اين اختلاف را مي‌توان موارد زير دانست: تفاوت در مواد تشکيل دهنده (خصوصاً محتواي رطوبتي)، ساختار سلولي، چگالي و سطح تماس حرارتي بين دانه‌هاي درون توده (محسنين 1980). از آنجا که گزارشي در خصوص تفاوت قابل ملاحظه در مواد

[1] Cumin seed
[2] Borage seeds

جدول2- مقايسه ميانگين اثر دما و رقم بر ضريب رسانش گرما (W/m°C) در پسته پوست‌گيري نشده

دما (°C)	رقم*		متوسط**
	اكبري	كله‌قوچي	
20	0/1795[d]	0/1769[d]	0/1782[C]
30	0/1923[b]	0/1891[c]	0/1907[B]
40	0/1993[a]	0/1986[a]	0/1989[A]
متوسط	0/1904	0/1882	0/1893

* ميانگين‌هاي برخوردار از حرف مشترك بر مبناي آزمون **LSD** تفاوت معني‌دار ندارند (**LSD% 5 = 0/0031**)

** مقدار **LSD** براي مقايسة متوسط ضريب رسانش گرما در سه دما (α=%5) برابر با **0/0022** مي‌باشد

تشكيل دهنده و ساختار سلولي بين ارقام محصول در دست نمي‌باشد بنظر مي‌رسد تفاوت چگالي و سطح تماس حرارتي بين دانه‌هاي درون توده (كه هر دو مورد ناشي از تفاوت در شكل و اندازه دانه‌ها مي‌باشد) در اين مورد از اهميت بيشتري برخوردار باشند. پژوهشي كه كوچك‌زاده قمي (1379) در خصوص ضريب رسانش گرماي دو رقم پستة خاني و عباسعلي كه هر دو از ارقام كشيده هستند انجام داد عدم تفاوت در ضريب رسانش گرما در اين دو رقم را نشان داد. نتايج پژوهش اخير مي‌تواند دليلي باشد براي اين مطلب كه تفاوت بين ضريب رسانش گرماي دو رقم پستة اكبري (از ارقام كشيده) و رقم كله‌قوچي (از ارقام گرد) ناشي از تفاوت در شكل دانه‌ها مي‌باشد. بر اساس گزارش مويسي و همكاران (1975) در خصوص ضريب رسانش گرماي كلزا براي ارقام ميداس[1] و تورچ[2] تفاوت معني‌داري (در سطح α=%5) بين ضريب رسانش گرماي اين دو رقم وجود دارد كه آنها اين تفاوت را ناشي از تفاوت در اندازه دانه‌ها دانسته‌اند در جدول 3 و شكل 5 روابط بين مقادير ضريب رسانش گرما بر حسب دما براي ارقام مورد پژوهش ارائه شده است. تجزية واريانس داده‌هاي بدست آمده از آزمايش دوم (بررسي رسانش گرما در رطوبت‌ها و دماهاي مختلف) نشان داد كه عامل رطوبت نيز مانند عامل دما در سطح احتمال 1% داراي اثر معني‌دار بر ضريب رسانش گرما مي‌باشد. مقايسه ميانگين توسط آزمون LSD حكايت از افزايش معني‌دار ضريب رسانش گرما در اثر افزايش رطوبت و دما دارد. همانگونه كه در جدول 4 نيز مشاهده مي‌گردد در بازة دمايي 20 تا 40 درجه سلسيوس با افزايش رطوبت از 20/9% به 51/8% (برپاية وزن‌تر) متوسط ضريب رسانش گرما از0/1145 به W/m°C 0/1904 افزايش مي‌يابد (جدول5). همانگونه كه در جدول 4 ديده مي‌شود اثر متقابل معني‌داري بين دو عامل رطوبت و دما از نظر ضريب رسانش دما در سطح احتمال 5% وجود دارد با وجود اين، اثر متقابل از نوع تغيير مقدار است يعني در كليه دماها سطوح بالاتر از ضريب رسانش گرماي بيشتري برخوردار بودند و ترتيب سطوح رطوبت و نيز سطوح دمايي (به جز در مورد دماهاي 20 و 30 درجه سانتي گراد در سطح رطوبتي (20/9) تغيير نيفته است.

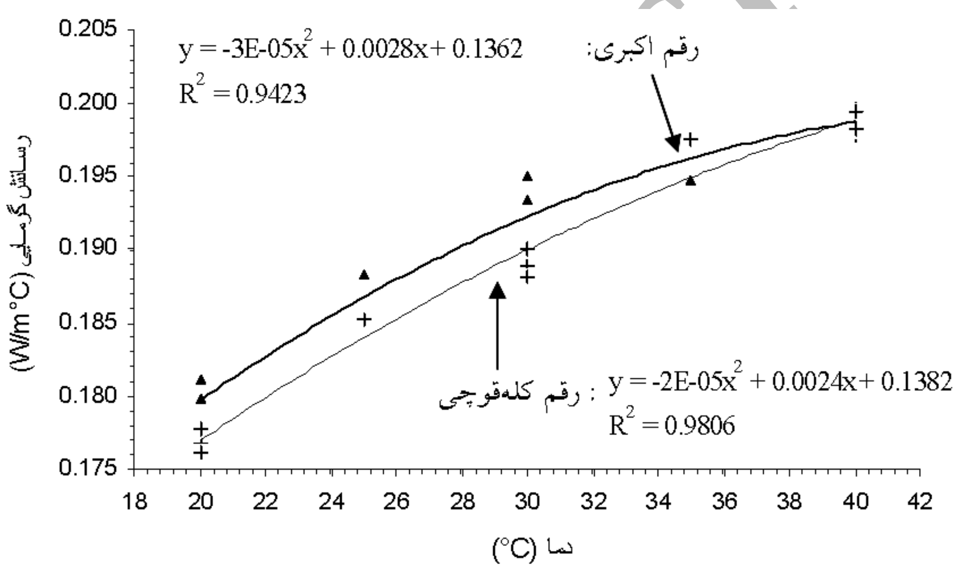
[1]Midas

[2]Torch

جدول **3**- روابط بين مقادير ضريب رسانش گرما بر حسب دما براي ارقام اكبري و كله قوچي

شماره معادله	رقم	R^2	معادله
[11]	اكبري	**0/9091**	$k = ۰/۰۰۱\,T + ۰/۱۶۲$
[12]	اكبري	**0/9423**	$k = -۳ \times ۱۰^{-۵} T^2 + ۲/۸ \times ۱۰^{-۳} T + ۰/۱۳۶۲$
[13]	كله‌قوچي	**0/9678**	$k = ۰/۰۰۱۱\,T + ۰/۱۵۶$
[14]	كله‌قوچي	**0/9806**	$k = -۲ \times ۱۰^{-۵} T^2 + ۲/۴ \times ۱۰^{-۳} T + ۰/۱۳۸۲$

در روابط فوق ***k*** ضريب رسانش گرما بر حسب **W/m°C** و **T** دما بر حسب **°C** مي‌باشد.



شكل**5**- منحني‌هاي برازش شده بر مقادير رسانش گرما

جدول**4**- تجزيه واريانس مقادير ضريب رسانش گرماي پسته در رطوبت و دماهاي مختلف

منابع تغيير	درجه آزادي	ميانگين مربعات (10^{-4})	F
رطوبت	**4**	**80/043**	**859/32****
دما	**2**	**6/989**	**74/42****
رطوبت × دما	**8**	**0/272**	**2/90***
خطا	**30**	**0/094**	

* و ** به ترتيب معني دار در سطح احتمال **5**% و **1**%

جدول5- مقايسه ميانگين اثر رطوبت و دما بر ضريب رسانش گرما (W/m°C) در پسته پوست‌گيري نشده

رطوبت (%w.b.)	دما (°C)* 20	30	40	متوسط**
51/8	**0/1795**[c]	**0/1923**[b]	**0/1993**[a]	**0/1904**[A]
42/3	**0/1606**[e]	**0/1717**[d]	**0/1759**[cd]	**0/1694**[B]
35/6	**0/1444**[g]	**0/1519**[f]	**0/1591**[e]	**0/1518**[C]
27/2	**0/1272**[j]	**0/1325**[i]	**0/1381**[h]	**0/1326**[D]
20/9	**0/1124**[l]	**0/1114**[l]	**0/1198**[k]	**0/1145**[E]
متوسط*	**0/1448**[C]	**0/1520**[B]	**0/1585**[A]	**0/1517**

*ميانگين‌هاي برخوردار از حرف مشترك بر مبناي آزمون **LSD** تفاوت معني‌دار ندارند. **(LSD %5 = 0/0051)**

مقدارLSD** براي مقايسة متوسط ضريب رسانش گرما در سطوح دما برابر با **0/0023** و براي سطوح رطوبت معادل **0/0029** مي‌باشد **(α=%5)**

مقادير فوق با ضريب رسانش كلزا (0/108تا 0/155W/m°C) در رطوبت 6/1% تا 12/8% و در بازه دمايي 4/4 تا 31/7 درجه سلسيوس نسبتاً قابل مقايسه بوده و از مقادير گزارش شده توسط كوچك‌زاده قمي (1379) براي پستة پوست‌گيري شده حدود 50% كوچك‌تر مي‌باشد. پايين‌تر بودن مقادير بدست آمده احتمالاً ناشي از تفاوت روش‌هاي مورد استفاده در اندازه‌گيري و تفاوت‌هاي ناشي از پوست پسته مي‌باشد. نتايج بدست آمده از پژوهش حاضر با گزارشاتي كه در خصوص افزايش ضريب رسانش گرما در اثر افزايش رطوبت در محصولاتي چون پسته، بادام‌زميني، زيرة سبز، بذرگل گاوزبان و برنج در دست است مطابقت دارد(سيوتر و همكاران 1975، موريتا و سينگ 1979، سو و همكاران 1991، سينگ و گوسوامي 2000، يانگ و همكاران 2002). مهم‌ترين دليلي كه مي‌توان افزايش ضريب رسانش گرما را ناشي از آن دانست بالاتر بودن ضريب رسانش گرماي آب نسبت به ساير مواد اجزاي تشكيل دهنده مي‌باشد. بر اين اساس بالاتر رفتن سهم آب در بين مواد تشكيل دهنده، ضريب رسانش محصول را افزايش داده و به ضريب رسانش آب نزديك مي‌نمايد (شكل 6).

روابط 15 و 16 كه از تجزية رگرسيون به روش حداقل مربعات روي داده‌ها بدست آمده مي‌تواند جهت پيش‌بيني مقادير ضريب رسانش گرما در بازة دمايي و رطوبتي پژوهش مورد استفاده قرار گيرد. در اين معادلات ضريب رسانش گرما به عنوان تابعي از دما و رطوبت به صورت رابطة خطي (R^2=0/9065) و مرتبة دو (R^2=0/9869) بيان گرديده است:

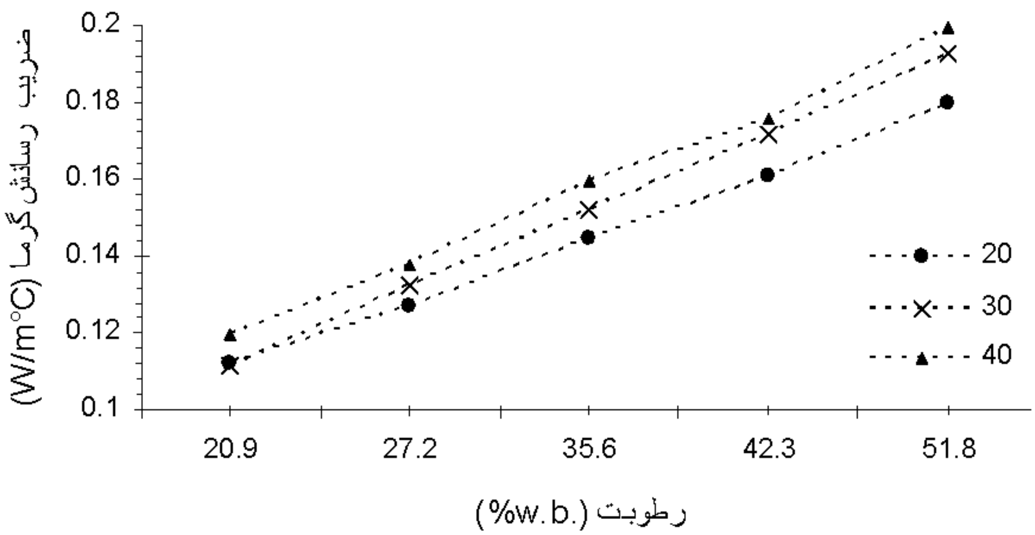
$$k = ۰/۰۶۴۷ + ۲/۹۴\times۱۰^{-۶}\,T + ۱/۹\times۱۰^{-۳}\,M + ۱/۹۱\times۱۰^{-۵}\,TM \quad [15]$$

$$k = ۰/۰۵۱۷ + ۲\times۱۰^{-۴}\,T - ۳/۳\times۱۰^{-۶}\,T^2 + ۲/۴۹\times۱۰^{-۳}\,M - ۸/۶\times۱۰^{-۶}\,M^2 + ۱/۹۱۱\times۱۰^{-۵}\,TM \quad [16]$$

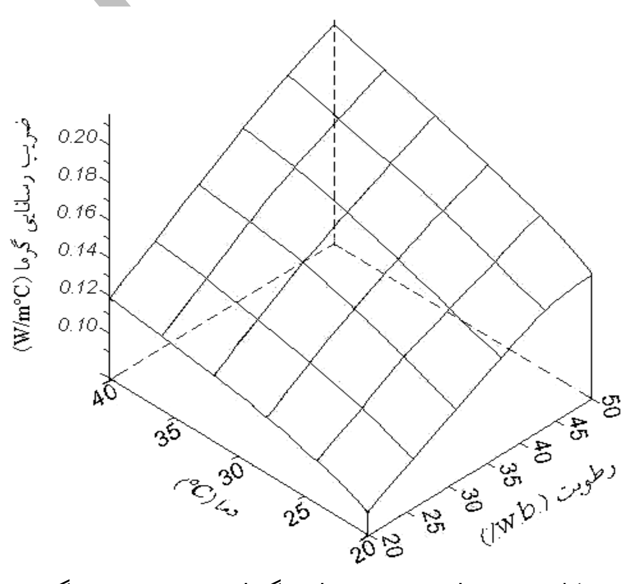
همچنانكه در شكل 7 نيز مشاهده مي‌گردد افزايش رطوبت و دما باعث افزايش ضريب رسانش گرما مي‌گردد.

سپاسگزاري

نگارندگان بر خود لازم مي‌دانند از همكاري بي‌دريـغ جناب آقاي مهندس ياسايي و همكاران محترم ايـشان در مزرعة ياسايي قدرداني نمايند.



شکل 6- افزايش ضريب رسانش گرما در اثر افزايش محتواي رطوبتي



شكل7- روية پاسخ ضريب رسانش گرماي توده پسته پوست‌گيري نشده.

منابع مورد استفاده

بي‌نام، 1383. آمارنامه كشاورزي ايران. دفتر آمار و فناوري اطلاعات وزارت جهاد كشاورزي.

توكلي هشجين ت، 1382. مكانيك محصولات كشاورزي (ترجمه). نشر خدمات فرهنگي سالكان.

رستمي ع الف، 1380. مقدمه‌اي بر انتقال حرارت (ترجمه). مركز نشر دانشگاه صنعتي اصفهان.

كوچك‌زاده قمي الف، 1379. بررسي خواص ترموفيزيكي پسته در فرآيند خشك كردن. رسالة دكتراي مهندسي مكانيك ماشين‌هاي كشاورزي. دانشكدة كشاورزي دانشگاه تربيت مدرس.

Anonymous, 1998. ASAE Standards: Moisture measurement-peanuts. American Society of Agricultural Engineers, Pp. 560-561. St. Joseph, MI, USA.

Fontana AJ, Wacker B, Campbell CS and Campbell GS, 2001. Simultaneous thermal conductivity, thermal resistivity, and thermal diffusivity measurement of selected foods and soils. ASAE Meeting Paper No. 016101. St Joseph, MI, USA.

Hsu MH, Mannapperuma JD and Singh RP, 1991. Physical and thermal properties of pistachios. Journal of Agricultural Engineering Research 49: 311-321.

Jasansky A and Bilansky WK, 1973. Thermal conductivity of whole and ground soybeans. Transactions of the ASAE 16(1): 100-103.

Kustermann M, Scherer R and Kutzbach HD, 1981. Thermal conductivity and diffusivity of shelled corn and grain. Journal of Food Process Engineering 4: 137-153.

Mohsenin NN, 1980. Thermal properties of food and agricultural materials. Gordon and Breach Science Publishers, New York.

Morita T and Singh RP, 1979. Physical and thermal properties of short-grain rough rice. Transactions of the ASAE, 22(3): 630-636.

Moysey EB, Shaw JT and Lampman WP, 1977. The effect of temperature and moisture on the thermal properties of rapeseed. Transactions of the ASAE 20(2): 461-464.

Sabapathy N and Tabil LG, 2003. Thermal conductivity of Kabuli type chickpea. ASAE Meeting Paper No. 030012. St. Joseph, MI, USA.

Singh KK and Goswami TK, 2000. Thermal properties of cumin seed. Journal of Food Engineering 45(00): 181-187.

Suter DA, Agrawal KK and Clary BL, 1975. Thermal properties of peanut pods, hulls and kernels. Transactions of the ASAE 18(2): 370-375.

Wratten FT, Poole WD, Chesness JL, Bal S and Ramarao V, 1969. Physical and thermal properties of rough rice. Transactions of the ASAE 12(6): 801-803.

Yang W, Sokhansanj S, Tang J and Winter P, 2002. Determination of thermal conductivity, specific heat and thermal diffusivity of borage seeds. Biosystems Engineering 82(2): 169-176.