

تعیین خواص حرارتی - فیزیکی آب لیموترش

امیدرضا روستاپور^۱، برات قبادیان^۲، محمد هادی خوش تقاضا^۳ و قاسم فخرپور^۴
۱، ۲، ۳، دانشجوی دکتری، دانشیار و استادیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس
۴، کارشناس ارشد، شرکت تحقیقاتی رنگ امیرکبیر، تهران
تاریخ پذیرش ۸۳/۸/۶

خلاصه

تعیین خواص حرارتی - فیزیکی آب لیموترش جهت بررسی، کنترل، پیش بینی و مدلسازی عددی فرآیندهایی از قبیل خشک شدن لازم و ضروری است. این خواص با تغییر درصد ماده جامد و دما تحت تاثیر قرار می‌گیرند. از این رو، در این تحقیق خواص حرارتی - فیزیکی آب لیموترش شامل ضریب هدایت حرارتی، جرم حجمی، گرمای ویژه و ضریب انتشار حرارتی در هشت سطح دما و سه سطح درصد ماده جامد بررسی و تعیین گردید. ضریب هدایت حرارتی توسط استوانه‌های هم محور در شرایط پایا و جرم حجمی توسط پیکنومتر حجمی اندازه گیری شده و جهت ایجاد سطوح دمایی از حمام هم دما که پیکنومتر در آن مستقر می‌گردد، استفاده شد. گرمای ویژه توسط اسکن کالریمتر (DSC) و ضریب انتشار حرارتی به روش غیر مستقیم و با استفاده از رابطه بین ضرایب هدایت حرارتی، گرمای ویژه و جرم حجمی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل از تحلیل آماری داده‌ها نشان می‌دهد که هم درصد ماده جامد و هم دما بر خواص حرارتی - فیزیکی آب لیموترش تاثیر معنی داری دارند. با افزایش درصد ماده جامد، جرم حجمی افزایش یافته ولی گرمای ویژه، ضریب هدایت حرارتی و ضریب انتشار حرارتی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش دما جرم حجمی کاهش یافته ولی گرمای ویژه، هدایت حرارتی و ضریب انتشار حرارتی افزایش می‌یابد. با تجزیه و تحلیل رگرسیون چند متغیره، مدل تجربی پیش بینی خواص حرارتی - فیزیکی آب لیموترش بر حسب متغیرهای کاری به دست آمد. ضریب تعیین مدل های خطی جرم حجمی و گرمای ویژه ۰/۹۹، هدایت حرارتی ۰/۹۵ و ضریب انتشار حرارتی ۰/۹۲ است.

واژه‌های کلیدی: ضریب هدایت حرارتی، جرم حجمی، گرمای ویژه، ضریب انتشار حرارتی، آب لیموترش

مقدمه

فیزیکی را تحت تاثیر قرار می‌دهد، مشکل می‌باشد. به علاوه خواص حرارتی - فیزیکی بعضی مواد غذایی با تغییر دما و درصد آب موجود در ماده تغییر اساسی نموده که آب لیموترش یکی از این محصولات است. مدل‌های ریاضی که وابستگی این خواص با دما و درصد آب موجود در ماده را بیان می‌دارند، جایگزین مناسبی برای مقادیر آزمایشی بوده و به عنوان ابزار مفیدی در طراحی تجهیزات و فرآیندهای خودکار به کمک رایانه می‌باشد. تحقیقات بسیاری توسط محققان مختلف جهت تعیین خواص حرارتی - فیزیکی مواد غذایی انجام گردیده است.

دانستن خواص حرارتی - فیزیکی مواد غذایی از قبیل گرمای ویژه، ضریب انتشار حرارتی و جرم حجمی در مهندسی صنایع غذایی ضروری است. ضرایب هدایت حرارتی و انتشار حرارتی جهت بررسی و کنترل فرآیندهای جابجایی از قبیل عملیات حرارتی و خشک کردن، به ویژه در فرآیندهای انتقال حرارت جابجایی در مایعات بسیار مهم هستند. بطور کلی مدل سازی، بهینه سازی و خودکار کردن فرآیندهای مواد غذایی به علت پیچیدگی مواد خام تشکیل دهنده محصول که خواص حرارتی -

جهت تعیین ظرفیت گرمایی مواد نم گیر مناسب تشخیص دادند (۸).

وانگ و یانگ یک کالریمتر خاص جهت اندازه گیری سریع هدایت حرارتی مایعات در طی زمان یک ثانیه ارائه دادند. آنها هدایت حرارتی مایعاتی از قبیل تولوئن و بنزن را در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد اندازه گیری و ارائه کردند (۲۳).

بهومیک و همکاران ضریب انتشار حرارتی و جرم حجمی گوجه فرنگی را در دمای ۲۶ درجه سانتیگراد تعیین نمودند (۲). همچنین پولی و همکاران مقادیر و داده های خواص حرارتی محصولات غذایی گوناگون را از قبیل آب گوجه فرنگی جمع آوری کردند. خواص حرارتی آب گوجه فرنگی بستگی شدیدی به در صد آب و دما دارد (۱۲).

در تحقیقات انجام شده توسط چوی و اوکوس، هدایت حرارتی و ضریب انتشار حرارتی آب گوجه فرنگی توسط دستگاه پروب با منبع حرارتی خطی به روش انتقال حرارت گذرا و جرم حجمی آن توسط پیکنومتر در محدوده دمایی ۲۰ تا ۱۵۰ درجه سانتیگراد و درصد ماده جامد ۴/۸ تا ۸۰ درصد اندازه گیری گردید. نتایج به دست آمده حاکی از این است که هدایت حرارتی، ضریب انتشار حرارتی و گرمای ویژه با افزایش دما و درصد آب موجود در ماده افزایش یافته و جرم حجمی با افزایش دما و درصد آب موجود در ماده کاهش می یابد (۳).

جرم حجمی محلول های مختلف ساکاروز توسط وست، به روش های پیکنومتری و هیدرواستاتیک تعیین گردید. نتایج حاکی از این است که جرم حجمی با افزایش درصد ماده جامد افزایش یافته و با افزایش دما کاهش می یابد (۲۵).

نتیجه تحقیقات انجام شده توسط کانستولا و همکاران، که ضمن آن خواص فیزیکی- حرارتی آب سیب زلال شده در محدوده دمایی ۲۰ تا ۹۰ درجه سانتیگراد و درصد غلظت ۱۲ تا ۷۰ درجه بریکس اندازه گیری گردید، حاکی از این است که جرم حجمی با افزایش غلظت، افزایش معنی داری داشته و با افزایش دما، کاهش قابل توجهی در آن بوجود می آید در حالیکه گرمای ویژه با افزایش درصد غلظت بصورت خطی کاهش یافته و با افزایش دما افزایش می یابد. بر اساس این تحقیق هدایت

بر اساس تحقیقات بعمل آمده، هدایت حرارتی آب میوه هایی از قبیل سیب، انگور و گلابی در دماهای ۲۰ تا ۸۰ درجه سانتیگراد و درصد آبهای مختلف در ماده اندازه گیری گردید که با افزایش دما و درصد آب موجود در ماده هدایت حرارتی افزایش می یابد (۱۳). تحقیقات دیگری نشان می دهد که ضریب هدایت حرارتی رابطه مستقیم با جرم حجمی ترکیبات داشته که آن هم ارتباط مستقیم با ساختمان شیمیایی ماده دارد (۲۲).

دیسنی با استفاده از کالریمتر یخ^۱ گرمای ویژه گندم سخت، برنج و جو دوسر و سایر محصولات آنها را اندازه گیری نمود. در این روش، محصول با وزن مشخص که در دمای اتاق قرار دارد، داخل کالریمتر یخ قرار داده شده و میزان ذوب یخ اندازه گیری می گردد (۷).

در تحقیقات انجام شده توسط سوتر و همکاران، گرمای ویژه بادام زمینی اسپانیایی به روش مخلوط^۲ تعیین شد. اساس این روش، اضافه کردن آب در دمای بالا به موادی است که باید ظرفیت گرمایی آن تعیین گردد. در این روش تماس مستقیم بین ماده غذایی و مبدل حرارتی وجود داشته، بنابراین تعیین گرمای ویژه محصولات غذایی نم گیر و همچنین مایعات توسط این روش ممکن نمی باشد (۱۹).

در تحقیقات انجام شده توسط هوانگ و هایاکاوا، یک کالریمتر خاص جهت تعیین مقادیر گرمای ویژه با قابلیت اطمینان بالا ارائه شد. در این وسیله تماس مستقیم بین محصول و مایع مبدل حرارتی وجود نداشته و یک روش کاربردی، به ویژه جهت تعیین گرمای ویژه مواد غذایی نم گیر می باشد. همچنین این روش زمانیکه دمای نمونه بالاتر از نقطه جوش آب می باشد، قابل استفاده است زیرا انرژی حرارتی خاصی برای تبخیر آب مصرف نمی شود. این محققین با این روش، گرمای ویژه آرد سفید گندم زمستانه، گوجه فرنگی، سیب زمینی و سیب درختی را تعیین نموده و این روش را با روش های دیگر کالریمتری مقایسه نموده و با توجه به اینکه تماس مستقیم بین نمونه و محیط مبدل حرارتی وجود ندارد، آن را

1. Ice calorimeter
2. Method of mixtures

مدلهای تجربی مناسبی را برای پیش بینی خواص ذکر شده که همه رابطه خطی با دما و درصد آب موجود داشته و با داده‌های آزمایشی بدست آمده تطابق خوبی دارند، ارائه نمودند. ضریب هدایت حرارتی به شیوه انتقال حرارت پایا و گرمای ویژه به شیوه انتقال حرارت گذرا با استفاده از دستگاه استوانه‌های هم محور ارائه شده توسط بلت و همکاران (۱۹۷۵) اندازه‌گیری و ضریب انتشار حرارتی در حالت گذرا توسط محفظه استوانه‌ای ارائه شده بوسیله دیکرسون (۱۹۶۵) اندازه‌گیری شده است. براساس تحقیقات به عمل آمده با افزایش دما و درصد آب موجود در آب پرتقال، گرمای ویژه، هدایت حرارتی و ضریب انتشار حرارتی افزایش یافته ولی جرم حجمی کاهش می‌یابد. همچنین درصد آب تاثیر بیشتری بر خواص ذکر شده در مقایسه با دما دارد (۲۱).

شریعتی- نیاسر و همکاران (۲۰۰۰) یک دستگاه پروب خاص برای اندازه‌گیری هدایت حرارتی مواد غذایی (مواد دانه‌ای، خمیری و مایع) تحت فشار در محدوده وسیعی از دما را ارائه و توسعه دادند. اندازه‌گیری‌ها بر اساس روش سیم داغ تحت شرایط گذرا بنا شده است. در این تحقیق هدایت حرارتی ژل نشاسته سبب زمینی در محدوده دمایی ۸۰-۲۵ درجه سانتیگراد، رطوبت ۸۰-۵۰ درصد و فشار ۰/۲-۰/۲ MPa تعیین گردیده است. براساس نتایج بدست آمده توسط این محققان، هدایت حرارتی ژل نشاسته با افزایش درجه حرارت و درصد رطوبت افزایش یافته و نیز با افزایش فشار تا ۰/۲ MPa افزایش می‌یابد. در فشارهای بیش از این مقدار، هدایت حرارتی تقریباً ثابت می‌ماند.

ضرایب هدایت حرارتی و انتشار حرارتی مایعات گلیسرول، پروپانول، متانول و اتانول به روش اندازه‌گیری پالس حرارتی توسط لیزر^۲ تعیین گردید. مقادیر به دست آمده توافق خوبی با مقادیر ارائه شده استاندارد دارد (۱۸).

در تحقیقات انجام شده توسط دمیرل و سندلر (۲۰۰۲)، انتقال جرم و حرارت در مایعاتی از قبیل تولونن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از این است که زوج شدن انتقال جرم و

حرارتی آب سیب با افزایش درصد ماده جامد به صورت خطی کاهش یافته و با افزایش دما به صورت خطی افزایش می‌یابد (۴). سویت گرمای ویژه بعضی مواد غذایی را توسط اسکن کالریمتر اندازه‌گیری نمود. این روش بسیار دقیق ولی گران می‌باشد (۲۰). در تحقیقات دیگری توسط بلت و همکاران (۱۹۷۵)، دستگاه استوانه‌های هم محور به منظور اندازه‌گیری گرمای ویژه مایعات، با حل کردن معادله فوریه در حالت گذرا ارائه گردید.

در تحقیقات انجام شده توسط محققان، روابط ریاضی جهت تخمین ظرفیت گرمایی مواد غذایی گوناگون که تابعی از ترکیبات تشکیل دهنده ماده مورد نظر می‌باشند، ارائه گردید. بررسی این روابط نشان می‌دهد که ظرفیت گرمایی مواد غذایی وابستگی شدیدی به درصد آب دارد بطوری که با افزایش درصد آب، ظرفیت گرمایی افزایش می‌یابد (۱۰، ۱۱، ۱۵).

وانگ و همکاران (۲۰۰۰) به منظور تعیین هدایت حرارتی مایعات یک مدل ریاضی که تابعی از دما و فشار می‌باشد، ارائه دادند. آنها هدایت حرارتی مایعاتی از قبیل آب، تولونن و بنزن را تعیین نمودند. همچنین نتایج حاصل از این مدل با نتایج به دست آمده از مدل‌های ارائه شده توسط محققین دیگر مقایسه گردید.

ضریب انتشار حرارتی را می‌توان با دانستن مقادیر هدایت حرارتی، ظرفیت گرمای ویژه و جرم حجمی محصول به دست آورد، منتهی مجموع خطاهای آزمایشی ضرایب اندازه‌گیری شده باعث افزایش درصد خطای مقادیر ضریب نفوذ حرارتی می‌گردد. ضریب انتشار حرارتی با اندازه‌گیری مستقیم آن با استفاده از یک محفظه استوانه‌ای^۱ و به شیوه انتقال حرارت گذرا با درصد خطای کمتر تعیین گردید (۶). همچنین سینگ (۱۹۸۲) با استفاده از این روش ضریب انتشار حرارتی تعدادی از مواد غذایی را با درصد خطای کم به دست آورد.

تلیس- رومرو و همکاران (۱۹۹۸) خواص حرارتی- فیزیکی آب پرتقال برزیلی را در محدوده دمایی ۰/۵ تا ۶۲ درجه سانتیگراد و درصد آب ۳۴٪ تا ۷۳٪ اندازه‌گیری و تعیین نموده و

حرارت وابستگی شدیدی به ضرایب هدایت حرارتی و ضریب انتشار حرارتی دارد.

جهت بهینه کردن فرآیند خشک کردن، می‌توان نسبت به مدلسازی عددی این فرآیند قبل از طراحی و ساخت خشک کن و اعمال پارامترهای لازم، اقدام نمود. به منظور مدلسازی عددی، دانستن خواص حرارتی- فیزیکی ماده لازم و ضروری است. از طرف دیگر با توجه به اینکه خواص حرارتی- فیزیکی آب لیموترش تاکنون اندازه‌گیری و مورد مطالعه قرار نگرفته است، هدف این مقاله تعیین جرم حجمی، گرمای ویژه، ضریب هدایت حرارتی و ضریب انتشار حرارتی آب لیموترش در دماها و درصد ماده جامد مختلف و ارائه مدل‌های تجربی، جهت بررسی همبستگی بین ضرایب نامبرده با پارامترهای دما و درصد ماده جامد می‌باشد.

مواد و روش‌ها

جهت بررسی تاثیر درصد ماده جامد و دما بر خواص حرارتی- فیزیکی آب لیموترش، این خواص در سه سطح درصد ماده جامد ۱۲، ۱۹، ۲۵ و در محدوده دمایی ۳۵ تا ۷۸ درجه سانتیگراد تعیین گردیده است. آب لیموترش تغلیظ نشده دارای ۱۲ درصد ماده جامد بوده که مواد تشکیل دهنده آن به ازاء ۱۰۰ گرم محصول، در جدول ۱ نشان داده شده است. برای اندازه‌گیری درصد ماده جامد، ۵ گرم نمونه آب لیموترش را به مدت ۸ ساعت در خشک کن تصعیدی^۱ با دمای ۴۰- درجه سانتیگراد و فشار ۲۰- اتمسفر قرار داده تا نمونه کاملاً خشک گردد. با توزین نمونه قبل و بعد از خشک کردن، درصد ماده جامد تعیین گردید. جهت تغلیظ آب لیمو و تهیه دو سطح دیگر درصد ماده جامد، از خشک کن آزمایشگاهی تخت^۲ در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد و سرعت ۲ متر بر ثانیه استفاده شد که با ایجاد جریان هوای گرم با سرعت‌های مختلف بر روی نمونه، منجر به تبخیر آب و تغلیظ نمونه گردید. سطح دوم درصد ماده جامد، ۱۹ درصد بود که با قرار دادن نمونه با درصد ماده جامد ۱۲ درصد در خشک کن آزمایشگاهی تخت به مدت یک ساعت،

بدست آمد. سطح سوم در صد ماده جامد ۲۵ درصد بود که با قرار دادن نمونه اولیه به مدت دو ساعت و پانزده دقیقه در این خشک کن، حاصل گردید. آزمایش‌های اندازه‌گیری ضرایب حرارتی- فیزیکی در هر سطح ماده جامد طی سه تکرار و ۸ سطح دما انجام شد.

هدایت حرارتی آب لیموترش توسط دستگاه آزمایشگاهی استوانه‌های هم محور اندازه‌گیری و تعیین گردید. قبل از استفاده از این دستگاه جهت اندازه‌گیری هدایت حرارتی آب لیموترش، ضروری است که نسبت به کالیبراسیون آن اقدام گردد. میزان تلفات حرارتی در دماهای مختلف و مقادیر توان خروجی گرم کن متفاوت است، لذا در سطوح مختلف از متغیرهای ذکر شده، نسبت به محاسبه تلفات حرارتی و کالیبره کردن دستگاه اقدام گردید. برای این منظور، بایستی از یک مایع که ضرایب هدایت حرارتی استاندارد آن در دماهای گوناگون مشخص باشد، استفاده نمود. مایع استفاده شده جهت کالیبراسیون دستگاه فوق، آب می‌باشد که مقادیر ضرایب هدایت حرارتی آن در فشار اتمسفر و در دماهای مختلف مشخص است. برای ایجاد شرایط هم دما، آزمایش‌ها در محیط بسته آزمایشگاهی که دمای آن توسط یک فن در دمای ۲۴ تا ۲۵ درجه سانتیگراد ثابت نگه داشته شده، انجام گردید.

ضریب هدایت حرارتی در حالت پایا طبق رابطه ۱ بدست می‌آید:

$$k = \frac{q * \left(\frac{r_2}{r_1} \right)}{(T_1 - T_2) * 2\pi L} \quad (1)$$

در این رابطه: k = ضریب هدایت حرارتی مایع مورد نظر
 T_1 (W) = شار حرارتی (توان حرارتی مصرفی)
 T_2 = دماهای دو طرف لایه مایع، $(^\circ\text{C})$ ، T_1 و T_2 = شعاع
 L = طول دو استوانه، ۲۱۰ میلی‌متر می‌باشد.

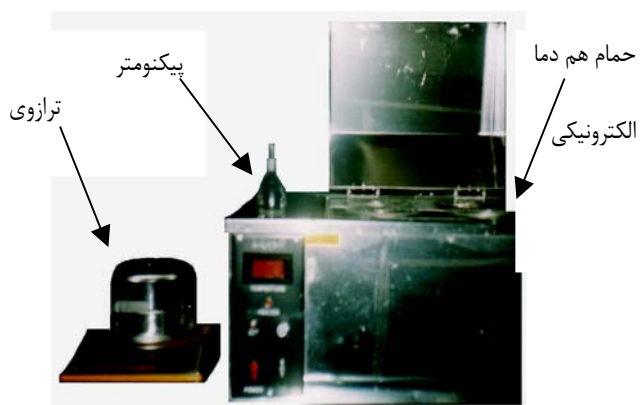
1. Freeze dryer

2. Flat dryer

جدول ۱- مواد تشکیل دهنده آب لیموترش به ازاء هر ۱۰۰ گرم

آب گرم	آنتی اکسیدان (PPm)	مواد فیبری (گرم)	ویتامین C (اسید آسکوربیک) (میلی گرم)	کربوهیدرات (گرم)	چربی (گرم)	پروتئین (گرم)
۸۷-۸۸	۲۵۰	۳/۸	۲۳-۳۵	۸/۱	۰-۰/۶۱	۰/۵

هم دما^۲ مستقر شد. با تنظیم دمای گرم کن حمام هم دما در نقطه مورد نظر، آب داخل حمام گرم شده و در نتیجه ماده داخل پیکنومتر بعد از مدتی به دمای مورد نظر می‌رسد. شکل ۱ تجهیزات لازم جهت اندازه‌گیری جرم حجمی که شامل پیکنومتر، حمام هم دما و ترازوی الکترونیکی می‌باشد را نشان می‌دهد. مایع موجود در پیکنومتر در اثر گرم شدن افزایش حجم پیدا کرده و چون حجم پیکنومتر ثابت می‌باشد، مایع اضافی در اثر افزایش حجم از درب پیکنومتر سر ریز خواهد شد. با وزن نمودن مجدد پیکنومتر حاوی مایع در این حالت، کاهش وزن در اثر افزایش حجم مایع و خروج آن از پیکنومتر مشاهده می‌گردد. با توجه به ثابت بودن حجم پیکنومتر (۵۰ میلی لیتر)، می‌توان جرم حجمی مایع را در دماهای مختلف محاسبه نمود. قبل از کاربرد پیکنومتر جهت تعیین جرم حجمی آب لیموترش، ابتدا پیکنومتر با استفاده از آب که مقادیر استاندارد جرم حجمی آن در دماهای مختلف که توسط محققین ارائه گردیده (۹)،



شکل ۱- تجهیزات لازم جهت اندازه‌گیری جرم حجمی آب لیموترش

کالیبره شده و سپس نسبت به اندازه‌گیری جرم حجمی آب لیموترش اقدام گردید. شکل ۲ مقادیر استاندارد جرم حجمی آب در محدوده دمایی صفر تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد و مقادیر جرم

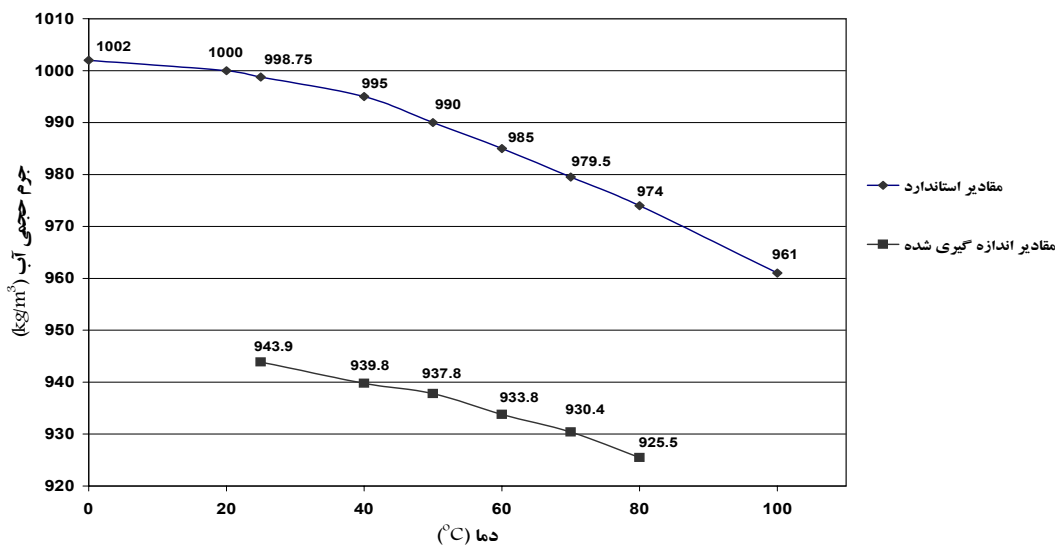
با مشخص بودن ضریب هدایت حرارتی آب، توان حرارتی مصرفی (q) از رابطه (۱) قابل دستیابی است. اختلاف بین توان الکتریکی گرم کن و توان مصرفی در حالت پایا، تلفات حرارتی سیستم می‌باشد. بعد از انجام کالیبراسیون دستگاه و تعیین تلفات حرارتی در دماهای مختلف به بررسی ضرایب هدایت حرارتی آب لیموترش پرداخته شد. آزمایشهای اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی آب لیموترش در سه سطح ماده جامد (۱۲، ۱۹ و ۲۵ درصد) و ۸ سطح دمای گرم کن (۴۰، ۴۵، ۵۳، ۵۸، ۶۳، ۶۸، ۷۱ و ۸۰ درجه سانتیگراد) طی سه تکرار انجام گردید. با توجه به اینکه میزان تلفات حرارتی در هر دما مشخص می‌باشد، لذا تفاضل توان الکتریکی گرم کن و حرارت تلف شده معرف توان حرارتی مصرفی (q) بوده و ضریب هدایت حرارتی به کمک رابطه (۱)، با داشتن مقدار توان حرارتی مصرفی، در هر دما بدست می‌آید. در واقع ضرایب به دست آمده، به عنوان ضریب هدایت حرارتی آب لیموترش در متوسط دمای لایه مایع در حالت پایا (متوسط دمای گرم کن، T_1 و دمای لایه بیرونی مایع، T_2) محسوب می‌گردد. هشت سطح دمای متوسط شامل ۳۸/۷، ۴۳، ۵۱/۳، ۵۵/۷، ۶۰/۵، ۶۵/۵، ۶۷/۹ و ۷۷/۴ درجه سانتیگراد می‌باشند. لازم به ذکر است که جرم حجمی، گرمای ویژه و ضریب انتشار حرارتی آب لیموترش در هشت سطح دمای یاد شده مورد بررسی قرار گرفت.

جرم حجمی آب لیموترش با استفاده از یک پیکنومتر حجمی^۱ ۵۰ میلی‌لیتری اندازه‌گیری گردید. برای اندازه‌گیری جرم حجمی، پیکنومتر از مایع مورد نظر پر شده و سپس توسط ترازوی دقیق توزین و مقدار آن با توجه به مشخص بودن حجم (۵۰ میلی لیتر) محاسبه می‌گردد. برای بررسی جرم حجمی در دماهای مختلف، پیکنومتر از مایع مورد نظر پر و در یک حمام

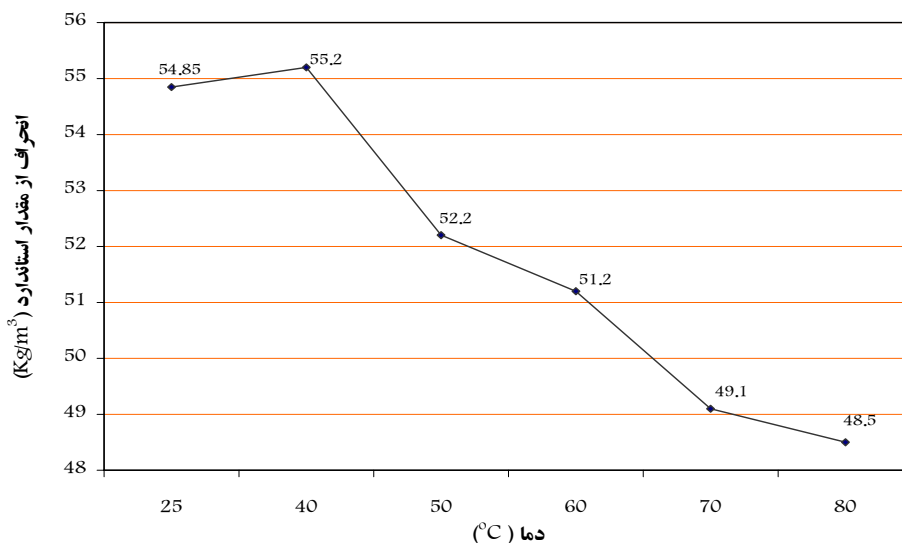
شده است.

آزمایشهای اندازه‌گیری جرم حجمی آب لیموترش در سه سطح ماده جامد ۱۲، ۱۹ و ۲۵ درصد و در هشت دمای ۷، ۳۸/۱، ۴۳/۳، ۵۱، ۵۵/۷، ۶۰/۵، ۶۵/۵، ۶۷/۹ و ۷۷/۴ درجه سانتیگراد در طی سه تکرار انجام گردید. با اضافه کردن مقادیر خطا در هر دما به مقادیر جرم حجمی به دست آمده توسط پیکنومتر در هر دما می‌توان مقادیر واقعی جرم حجمی در هر حالت از درصد ماده جامد و دما را به دست آورد.

حجمی آب در محدوده دمایی ۲۵ تا ۸۰ درجه سانتیگراد را که توسط پیکنومتر ۵۰ میلی لیتری تعیین شده، نشان می‌دهد. نتایج حاکی از این است که مقادیر جرم حجمی اندازه‌گیری شده از مقادیر استاندارد کمتر بوده که به علت خطای پیکنومتر و خطاهای موجود در طی اندازه‌گیری می‌باشد. لذا در هر دما، انحراف از مقدار استاندارد جرم حجمی بایستی به مقدار جرم حجمی اندازه‌گیری شده توسط پیکنومتر افزوده گردد. منحنی کالیبراسیون پیکنومتر که معرف میزان انحراف از مقدار واقعی استاندارد) در دماهای مختلف می‌باشد، در شکل ۳ نشان داده



شکل ۲- جرم حجمی استاندارد و اندازه‌گیری شده آب توسط پیکنومتر ۵۰ میلی لیتری در دماهای مختلف



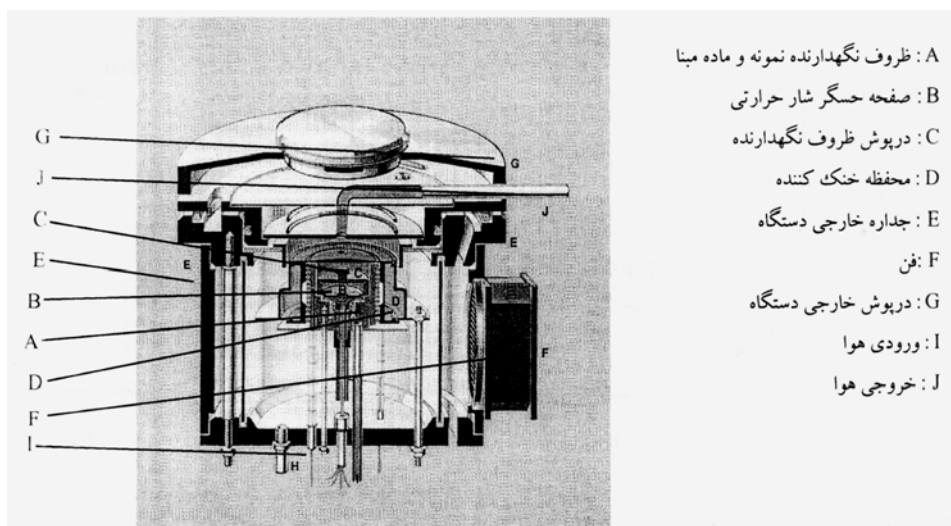
شکل ۳- منحنی کالیبراسیون پیکنومتر ۵۰ میلی لیتری با استفاده از آب

به منظور اندازه‌گیری گرمای ویژه آب لیموترش، ابتدا دستگاه کالریمتر توسط آب کالیبره شده، بدین طریق که در ظرف نمونه آب ریخته شد و در محدوده دمایی ۳۰ تا ۹۰ درجه سانتیگراد تغییرات گرمای ویژه آب بررسی و تعیین گردید. با مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده توسط کالریمتر و مقادیر استاندارد گرمای ویژه آب (۱۴) می‌توان میزان خطای دستگاه و به عبارتی میزان انحراف مقادیر به دست آمده توسط دستگاه از مقادیر استاندارد را در هر دما به دست آورد. شکل ۵ مقادیر استاندارد گرمای ویژه آب و مقادیر اندازه‌گیری شده توسط دستگاه اسکن کالریمتر را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از این است که مقادیر اندازه‌گیری شده توسط دستگاه از مقادیر استاندارد کمتر است. منحنی کالیبراسیون این دستگاه در شکل ۶ مشاهده می‌گردد.

بعد از کالیبره کردن کالریمتر نسبت به بررسی و تعیین گرمای ویژه آب لیموترش در سه سطح درصد ماده جامد وهشت سطح دما طی سه تکرار اقدام گردید. با توجه به منحنی کالیبراسیون و داشتن مقادیر خطا در هر دما و با اضافه کردن آن به مقادیر اندازه‌گیری شده توسط دستگاه می‌توان به مقادیر واقعی ظرفیت گرمایی ویژه در هر دما دست یافت.

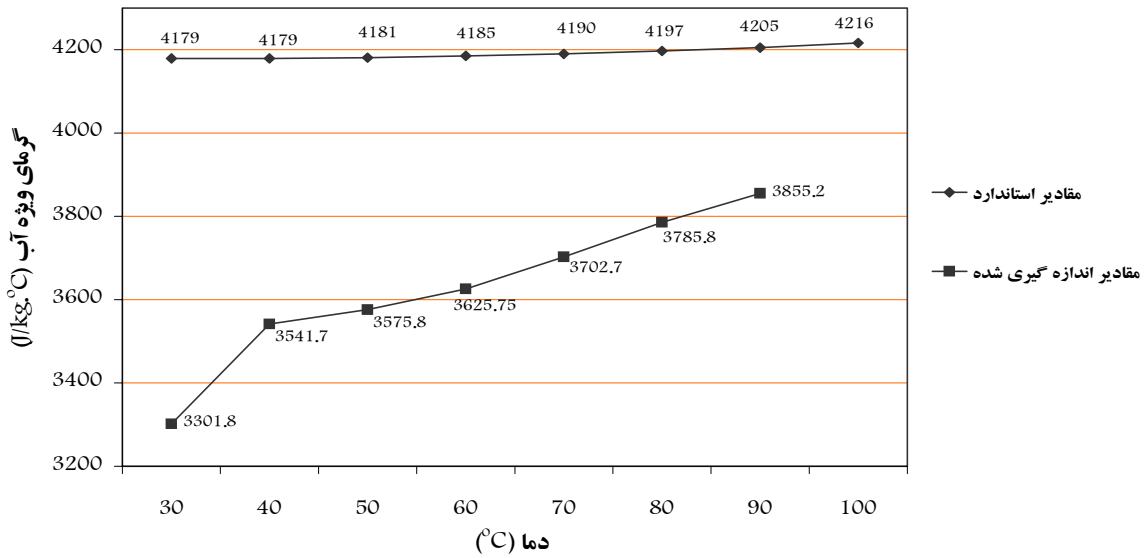
گرمای ویژه^۱ آب لیمو به روش اسکن کالریمتر^۲ (DSC) اندازه‌گیری و تعیین گردید. این روش استفاده وسیعی در اندازه‌گیری ظرفیت گرمایی و نرخ انتقال حرارت به صورت تابعی از دما داشته و تغییرات انرژی حرارتی در ماده را در محدوده دمایی ۱۷۰- تا ۷۷۰ درجه سانتیگراد اندازه‌گیری می‌نماید. اساس کار روش فوق، اندازه‌گیری تغییرات دمایی خیلی کوچک در ماده طی فرآیند حرارتی می‌باشد. اسکن کالریمتر دارای دو ظرف به حجم ۲ میلی لیتر بوده که در داخل یکی از آنها نمونه ماده و در ظرف دیگر ماده مبنا که یاقوت کیود^۳ می‌باشد، مستقر شده و سپس درب ظرفها بسته و تحت عملیات حرارتی قرار می‌گیرند. واحد ضبط کننده سیستم، تغییرات انرژی حرارتی ماده اصلی و ماده مبنا را در یک محدوده دمایی اندازه‌گیری و میزان انرژی حرارتی جذب یا دفع شده توسط ماده اصلی را محاسبه می‌نماید. شکل ۴ نمای داخلی این دستگاه را نشان می‌دهد.

- 1 - Specific heat
- 2 - Differential scanning calorimetry
- 3 - Sapphire

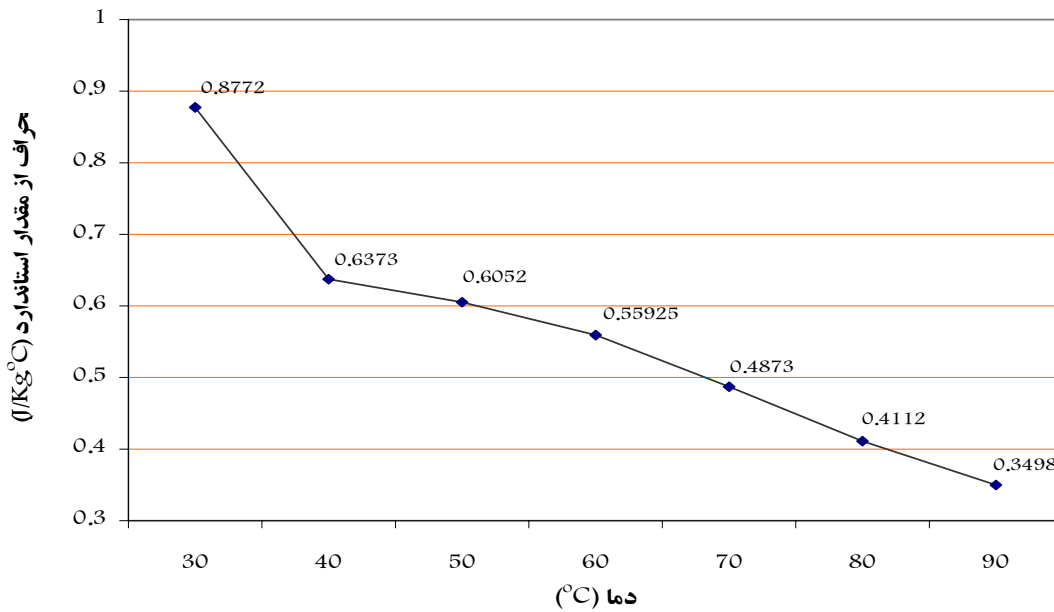


- A: ظروف نگهدارنده نمونه و ماده مبنا
- B: صفحه حسگر شار حرارتی
- C: درپوش ظروف نگهدارنده
- D: محفظه خنک کننده
- E: جداره خارجی دستگاه
- F: فن
- G: درپوش خارجی دستگاه
- I: ورودی هوا
- J: خروجی هوا

شکل ۴- نمای داخلی دستگاه اسکن کالریمتر (DSC)



شکل ۵- گرمای ویژه استاندارد و اندازه گیری شده آب توسط اسکن کالریمتر در دماهای مختلف



شکل ۶- منحنی کالیبراسیون دستگاه اسکن کالریمتر (DSC) با استفاده از آب

انتشار حرارتی آب لیموترش در سه سطح درصد ماده جامد و هشت سطح دما محاسبه گردید.

$$\alpha = \frac{k}{Cw}, \quad Cw = \rho * c \quad (۲)$$

در این رابطه: α = ضریب انتشار حرارتی (m^2/s) ،
 k = ضریب هدایت حرارتی ($W/m.°C$) Cw = ظرفیت گرمایی حجمی ($J/m^3 . C$) ، و c = گرمای ویژه ($J/kg.°C$) است.

ضریب انتشار حرارتی در واقع نرخ انتشار گرما در ماده بوده و نسبت ضریب هدایت حرارتی به ظرفیت گرمایی حجمی $^1 (Cw)$ می باشد. ظرفیت گرمایی حجمی معیار توانایی ذخیره انرژی توسط ماده است. با مشخص بودن ضریب هدایت حرارتی، جرم حجمی و گرمای ویژه و با استفاده از رابطه (۲)، ضریب

1- Volumetric heat capacity

هدایت حرارتی کاهش می‌یابد. نتایج این تحقیق مشابه نتایج به دست آمده توسط شریعتی- نیاسر و همکاران (۲۰۰۰) که هدایت حرارتی مواد غذایی خمیری و مایع را اندازه‌گیری کرده‌اند می‌باشد. جدول ۲ تغییرات ضریب هدایت حرارتی آب لیموترش در سطوح مختلف درصد ماده جامد و دما را نشان می‌دهد. حروف مشابه در هر ردیف جدول، بیانگر عدم اختلاف معنی دار بین میانگین ضرایب هدایت حرارتی در سطوح مختلف می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌گردد درصد ماده جامد نسبت به دما تأثیر بیشتری در تغییرات هدایت حرارتی دارد.

جهت به دست آوردن مدلی مناسب که تغییرات ضریب هدایت حرارتی آب لیموترش با متغیرهای مستقل درصد ماده جامد و دما را نشان بدهد، از رگرسیون چند متغیره استفاده گردیده است. مدل رگرسیونی به دست آمده یک مدل خطی دو متغیره می‌باشد که ضریب تعیین، R^2 ، ۰/۹۵ بوده و اشاره بر این دارد که مدل برازش شده ۹۵ درصد تغییرات ضریب هدایت حرارتی را بیان می‌کند. رابطه خطی به دست آمده بین متغیر وابسته ضریب هدایت حرارتی (k) و متغیرهای مستقل درصد ماده جامد (X_2) و دما (T) به صورت رابطه (۳) است:

$$k = 0.484759 - 0.131662 X_2 + 0.0479973 T \quad (3)$$

$$R^2 = 0.95$$

شکل ۷ رابطه ضرایب هدایت حرارتی با پارامترهای درصد ماده جامد و دما و همچنین، مدل های خطی برازش شده بر داده های آزمون را نشان می‌دهد. در شکل (۸) رابطه بین ضرایب هدایت حرارتی اندازه‌گیری شده و مدل تجربی نشان داده شده است.

خواص حرارتی- فیزیکی آب لیموترش شامل جرم حجمی، گرمای ویژه، ضریب هدایت حرارتی و ضریب انتشارحرارتی در هشت سطح دما، سه سطح درصد ماده جامد و در سه تکرار طی ۷۲ آزمایش در قالب طرح آماری فاکتوریل بر پایه طرح بلوک کامل تصادفی مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق، همچنین یک مدل تجربی که رابطه بین هر یک از خواص حرارتی- فیزیکی با پارامترهای کاری دما و درصد ماده جامد را نشان می‌دهد، ارائه گردید. تمام این مدلها خطی می‌باشند.

نتایج و بحث

نتایج هدایت حرارتی آب لیموترش حاکی از این است که درصد ماده جامد و دما با اطمینان ۹۹ درصد تأثیر معنی‌داری بر هدایت حرارتی دارد. همچنین، برهمکنش دو فاکتور دما و درصد ماده جامد در سطح ۱ درصد معنی دار نمی‌باشد.

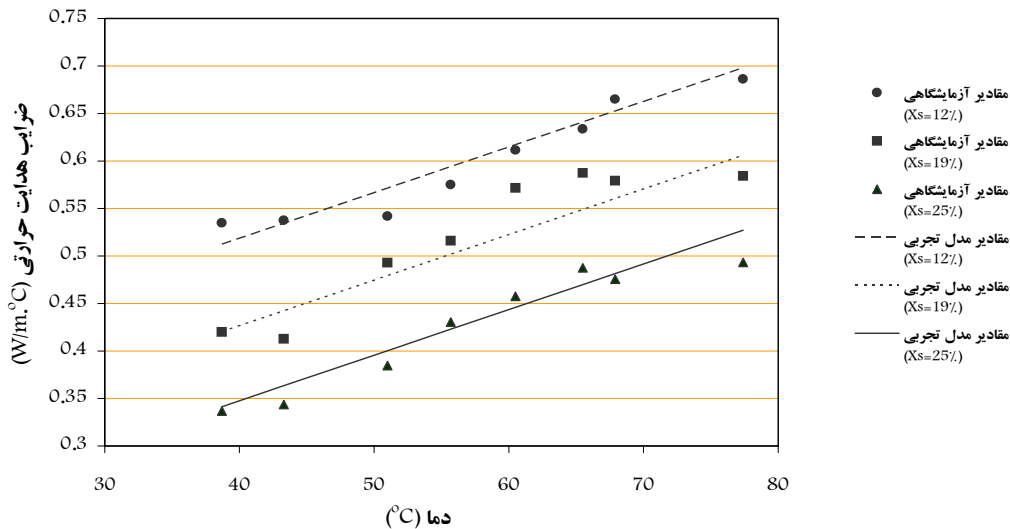
نتایج حاصل از مقایسه میانگین های ضرایب هدایت حرارتی آب لیموترش به روش دانکن حاکی از افزایش این ضریب با افزایش دما می‌باشد. با افزایش دما، انرژی حرارتی مولکولها افزایش یافته که باعث افزایش جنبش مولکولی و برخورد بین آنها گردیده و در نتیجه نرخ انتقال حرارت و ضریب هدایت حرارتی هم افزایش می‌یابد.

همچنین با افزایش درصد ماده جامد جنبش مولکولی کاهش یافته و با توجه به اینکه آب نسبت به مواد جامد تشکیل دهنده هدایت حرارتی بالاتری دارد، لذا با کاهش درصد آب،

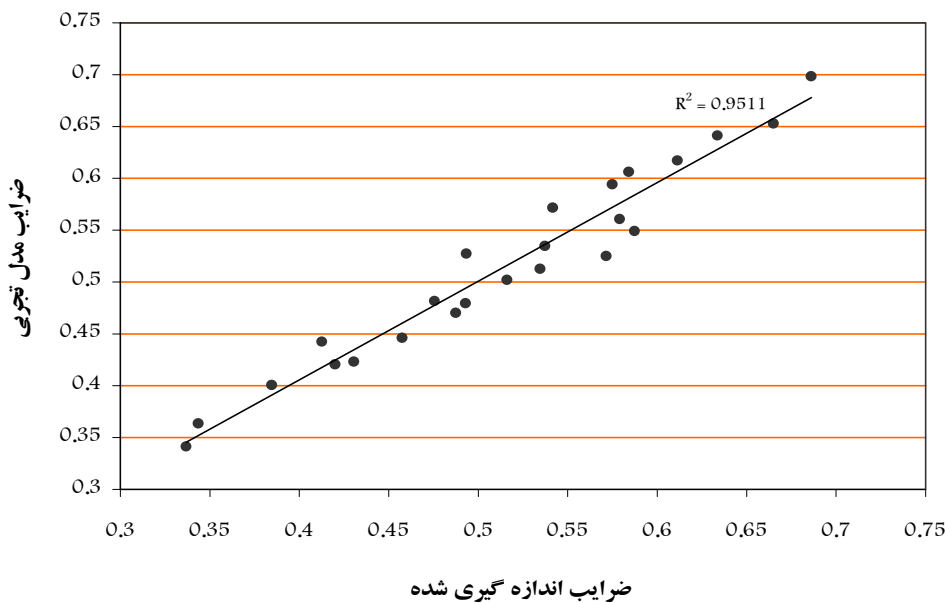
جدول ۲- مقایسه میانگین‌های ضریب هدایت حرارتی (W/m.°C) آب لیموترش در سطوح مختلف درصد ماده جامد و دما

سطوح دما (°C)	۳۸/۷	۴۳/۳	۵۱	۵۵/۷	۶۰/۵	۶۵/۵	۶۷/۹	۷۷/۴
۱۲	۰/۵۳۵	۰/۵۳۷	۰/۵۴۲	۰/۵۷۵	۰/۶۱۱	۰/۶۳۴	۰/۶۶۵	۰/۶۸۶
سطوح درصد ماده جامد (kg/kg)	defg	def	def	cde	bcd	abc	ab	a
	۱۹	۰/۴۲۰	۰/۴۱۳	۰/۴۹۳	۰/۵۱۶	۰/۵۷۲	۰/۵۷۹	۰/۵۸۴
	hij	ijk	fgh	efg	cde	cde	cde	cde
۲۵	۰/۳۳۷	۰/۳۴۴	۰/۳۸۵	۰/۴۳۱	۰/۴۵۸	۰/۴۸۸	۰/۴۷۶	۰/۴۹۳
	l	kl	jkl	hij	ghij	Fghi	fghi	fgh

حروف مشابه درجه بندی دانکن نشانگر عدم اختلاف معنی دار بین مقادیر ضریب هدایت حرارتی است



شکل ۷- رابطه بین دما و ضریب هدایت حرارتی در درصدهای مختلف ماده جامد



شکل ۸- رابطه بین ضریب هدایت حرارتی اندازه‌گیری شده و مدل تجربی

نتایج حاصل از مقایسه میانگین‌های مقادیر جرم حجمی آب لیموترش به روش دانکن حاکی از کاهش این ضریب با افزایش دما می‌باشد. با افزایش دما آب لیموترش مستقر شده در پیکنومتر افزایش حجم داده و از درب پیکنومتر سرریز و به خارج از ظرف ریخته می‌شود. بنابراین، وزن نهایی مایع و پیکنومتر کاهش یافته و با توجه به اینکه حجم ظرف پیکنومتر ثابت و مساوی ۵۰ میلی لیتر است، جرم حجمی کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به آزمون مقایسه میانگین‌ها مشخص گردید

نتایج حاصل از تجزیه واریانس مقادیر جرم حجمی نشان می‌دهد که با اطمینان ۹۹ درصد، اختلاف معنی‌داری بین مقادیر جرم حجمی در سه سطح درصد ماده جامد و همچنین در هشت سطح دما وجود دارد. لازم به ذکر است که برهمکنش دو فاکتور دما و درصد ماده جامد در سطح ۱ درصد معنی‌دار بوده و نشانگر این است که روند تغییرات جرم حجمی با تغییر دما در سطوح مختلف درصد ماده جامد متفاوت است.

متغیرها را با هم نشان دهد، ضریب همبستگی بین آنها است. مدل رگرسیونی به دست آمده یک مدل خطی دو متغیره می‌باشد که ضریب تعیین، R^2 ، ۰/۹۹ بوده و اشاره بر این دارد که مدل برازش شده ۹۹ درصد تغییرات جرم حجمی را بیان می‌کند. رابطه خطی بدست آمده بین متغیر مستقل جرم حجمی آب لیموترش (ρ) و متغیرهای وابسته درصد ماده جامد (X_s) و دما (T) به صورت رابطه (۴) می‌باشد:

$$\rho = 1022/32 + 2/97078 X_s - 0/609167 T \quad (4)$$

$$R^2 = 0.99$$

شکل ۹ رابطه جرم حجمی با پارامترهای درصد ماده جامد و دما و همچنین، مدل های خطی گذرانده شده بر داده‌های آزمون را نشان می‌دهد. در شکل (۱۰) رابطه بین مقادیر جرم حجمی اندازه‌گیری شده و مدل تجربی قابل مشاهده می‌باشد.

که با افزایش درصد ماده جامد آب لیموترش جرم حجمی افزایش می‌یابد زیرا افزایش درصد ماده جامد باعث افزایش تمرکز ماده جامد در واحد حجم می‌شود.

() -

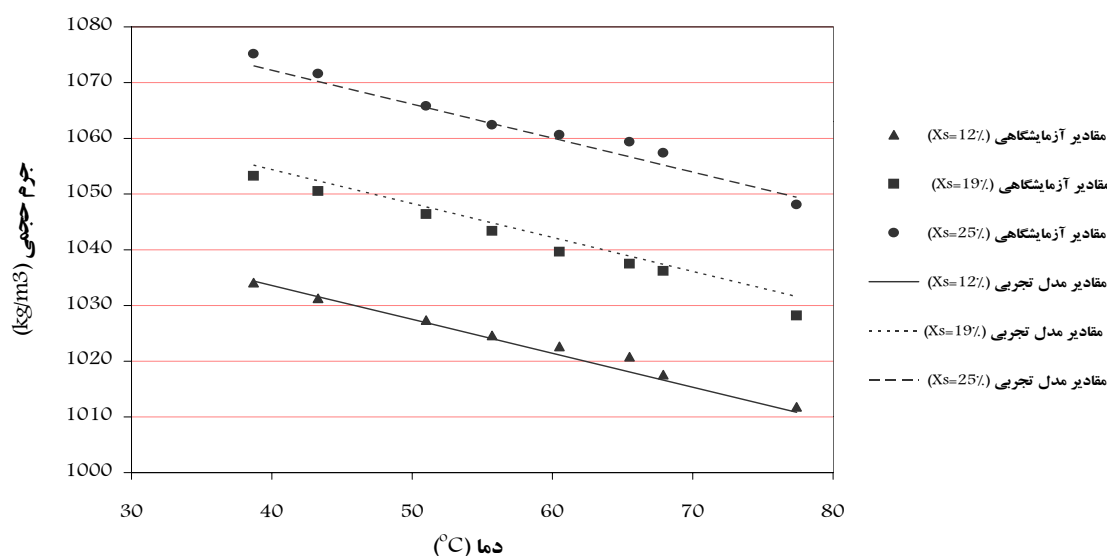
جدول ۳ روند تغییرات مقادیر جرم حجمی

آب لیموترش در سطوح مختلف درصد ماده جامد و دما را نشان می‌دهد. حروف مشابه در هر ردیف جدول بیانگر عدم اختلاف معنی دار بین میانگین‌های جرم حجمی در سطوح مختلف است. به منظور به دست آوردن مدل تجربی که رابطه بین متغیر وابسته جرم حجمی و متغیرهای مستقل دما و درصد ماده جامد را بیان کند، از رگرسیون چند متغیره استفاده گردید. معیار بهترین مدل برازش یا رابطه‌ای که با اطمینان زیاد روابط بین

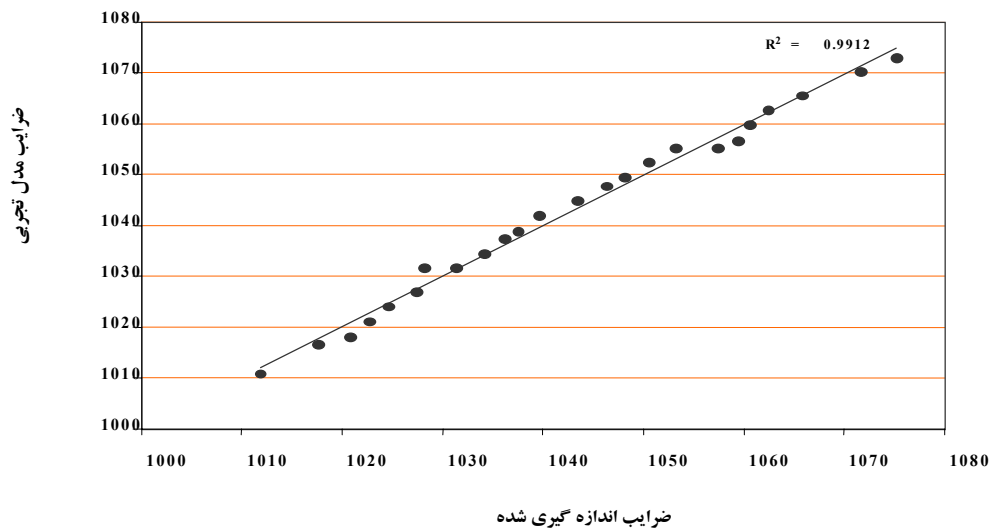
جدول ۳- مقایسه میانگین‌های جرم حجمی (kg/m^3) آب لیموترش در سطوح مختلف درصد ماده جامد و دما

سطوح دما ($^{\circ}\text{C}$)								۱۲	سطوح درصد ماده جامد (kg/kg)
۷۷/۴	۶۷/۹	۶۵/۵	۶۰/۵	۵۵/۷	۵۱	۴۳/۳	۳۸/۷		
۱۰۱۲	۱۰۱۸	۱۰۲۱	۱۰۲۳	۱۰۲۵	۱۰۲۷	۱۰۳۱	۱۰۳۴	۱۹	
x	w	v	u	t	s	q	p		
۱۰۲۸	۱۰۳۶	۱۰۳۷	۱۰۴۰	۱۰۴۳	۱۰۴۶	۱۰۵۱	۱۰۵۳	۲۵	
r	o	n	m	l	k	i	h		
۱۰۴۸	۱۰۵۷	۱۰۵۹	۱۰۶۱	۱۰۶۲	۱۰۶۶	۱۰۷۲	۱۰۷۵		
j	g	f	e	d	c	b	a		

حروف مشابه درجه بندی دانکن نشانگر عدم اختلاف معنی دار بین مقادیر جرم حجمی است



شکل ۹- رابطه بین دما و جرم حجمی در درصد‌های مختلف ماده جامد



شکل ۱۰- رابطه بین جرم حجمی اندازه‌گیری شده و مدل تجربی

است. به منظور ارائه یک مدل تجربی مناسب که رابطه تغییرات گرمای ویژه آب لیموترش با تغییرات درصد ماده جامد و دما را نشان دهد، از رگرسیون چند متغیره استفاده گردید. مدل رگرسیونی به دست آمده یک مدل خطی دو متغیره بوده که ضریب تعیین، R^2 ، ۰/۹۹ می‌باشد و اشاره بر این دارد که مدل برازش شده ۹۹ درصد تغییرات گرمای ویژه را بیان می‌نماید. رابطه خطی بدست آمده بین متغیر وابسته گرمای ویژه آب لیموترش (c) و متغیرهای مستقل درصد ماده جامد (X_s) و دما (T) در رابطه (۵) قابل مشاهده است:

$$c = 328.072 - 28.6771 X_s + 4.54118T \quad R^2 = 0.99 \quad (5)$$

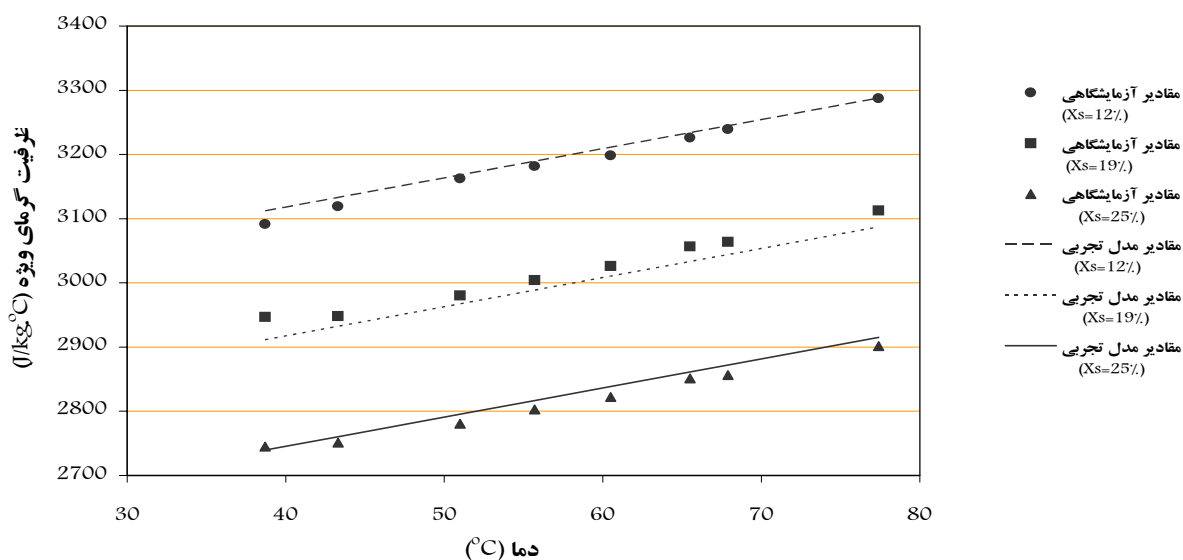
شکل ۱۱ رابطه گرمای ویژه با پارامترهای درصد ماده جامد و دما و همچنین مدل های خطی گذرانده شده بر داده‌های آزمون را نشان داده و در شکل (۱۲) رابطه بین گرمای ویژه اندازه‌گیری شده و مدل تجربی مشاهده می‌گردد.

نتایج به دست آمده از تحلیل آماری مقادیر گرمای ویژه بیانگر معنی‌دار بودن تاثیر درصد ماده جامد و دما بر مقدار این ضریب برای آب لیموترش با اطمینان ۹۹ درصد می‌باشد. برهمکنش درصد ماده جامد و دما معنی دار بوده و به عبارتی روند تغییرات گرمای ویژه با تغییر دما در سطوح مختلف درصد ماده جامد متفاوت است. آزمون مقایسه میانگین‌ها به روش دانکن بیانگر افزایش گرمای ویژه آب لیموترش با افزایش دما و کاهش آن با افزایش درصد ماده جامد می‌باشد. این نتایج مشابه نتایج به دست آمده توسط تلیس-رومر و همکاران (۲۱) که خواص حرارتی-فیزیکی آب پرتقال برزلی را بررسی نموده‌اند، می‌باشد. جدول ۴ روند تغییرات مقادیر گرمای ویژه آب لیموترش در سطوح مختلف درصد ماده جامد و دما را نشان می‌دهد. حروف مشابه در هر ردیف جدول، بیانگر عدم اختلاف معنی دار بین میانگین‌های جرم حجمی در سطوح مختلف

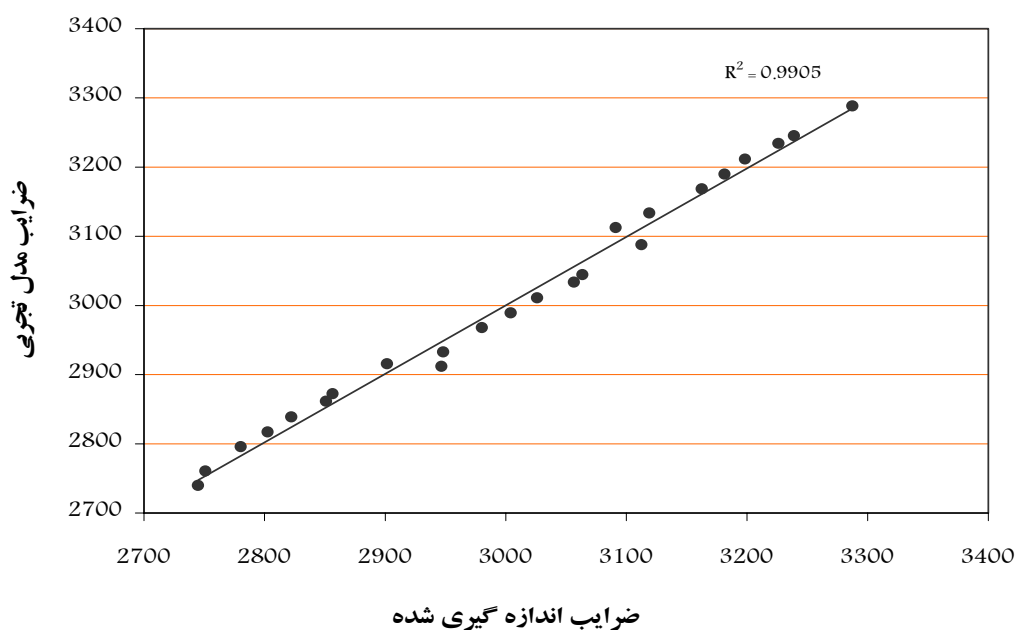
جدول ۴- مقایسه میانگین‌های گرمای ویژه ($J/kg.^{\circ}C$) آب لیموترش در سطوح مختلف درصد ماده جامد و دما

سطوح دما ($^{\circ}C$)								سطوح درصد ماده جامد (kg/kg)
۷۷/۴	۶۷/۹	۶۵/۵	۶۰/۵	۵۵/۷	۵۱	۴۳/۳	۳۸/۷	
۳۲۸۸	۳۲۳۹	۳۲۲۶	۳۱۹۹	۳۱۸۲	۳۱۶۳	۳۱۱۹	۳۰۹۱	
a	b	c	d	e	f	g	i	
۳۱۱۳	۳۰۶۴	۳۰۵۷	۳۰۲۶	۳۰۰۴	۲۹۸۰	۲۹۴۸	۲۹۴۷	
h	j	k	l	m	n	o	o	
۲۹۰۲	۲۸۵۷	۲۸۵۱	۲۸۲۲	۲۸۰۳	۲۷۸۱	۲۷۵۱	۲۷۴۵	
p	q	r	s	t	u	v	w	

حروف مشابه درجه بندی دانکن نشانگر عدم اختلاف معنی دار بین مقادیر گرمای ویژه است



شکل ۱۱- رابطه بین دما و گرمای ویژه در درصدهای مختلف ماده جامد



شکل ۱۲- رابطه بین گرمای ویژه اندازه گیری شده و مدل تجربی

آزمون مقایسه میانگین‌های دانکن نشانگر کاهش ضریب انتشارحرارتی آب لیموترش با افزایش درصد ماده جامد و افزایش این ضریب با افزایش دما می‌باشد (جدول ۵). نتایج به دست آمده مشابه تحقیقات انجام شده توسط تلیس- رومرو و همکاران (۱۹۹۸) که ضریب انتشارحرارتی آب پرتقال برزیلی را به دست آورده‌اند، می‌باشد. با افزایش دمای ماده نرخ انتقال حرارت در ماده افزایش یافته و در نتیجه ضریب انتشار حرارتی

این ضریب به صورت غیرمستقیم و با استفاده از رابطه (۲) در درصدهای مختلف ماده جامد و دماهای گوناگون محاسبه و تعیین شده و سپس مقادیر به دست آمده مورد بررسی و تحلیل آماری قرار گرفت. نتایج به دست آمده بیانگر این است که با اطمینان ۹۹ درصد دما و درصد ماده جامد تاثیر معنی داری بر تغییرات ضریب انتشارحرارتی آب لیموترش دارند.

افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش درصد ماده جامد، جرم حجمی افزایش پیدا کرده و در نتیجه ضریب انتشار حرارتی کاهش می‌یابد.

مدل خطی برازش شده که رابطه بین ضریب انتشار حرارتی آب لیموترش با درصد ماده جامد و دما را نشان می‌دهد در رابطه (۶) بیان گردیده است. ضریب تعیین این مدل، $R^2 = 0.92$ بوده و به عبارتی ۹۲ درصد تغییرات ضریب نفوذ حرارتی را بیان می‌کند. در این رابطه، α ضریب انتشار حرارتی، X_s درصد ماده

جامد و T دما می‌باشد.

$$\alpha = \frac{1}{\rho C_p} \left(\frac{d}{dt} X_s + \frac{dT}{dt} \right) \quad (6)$$

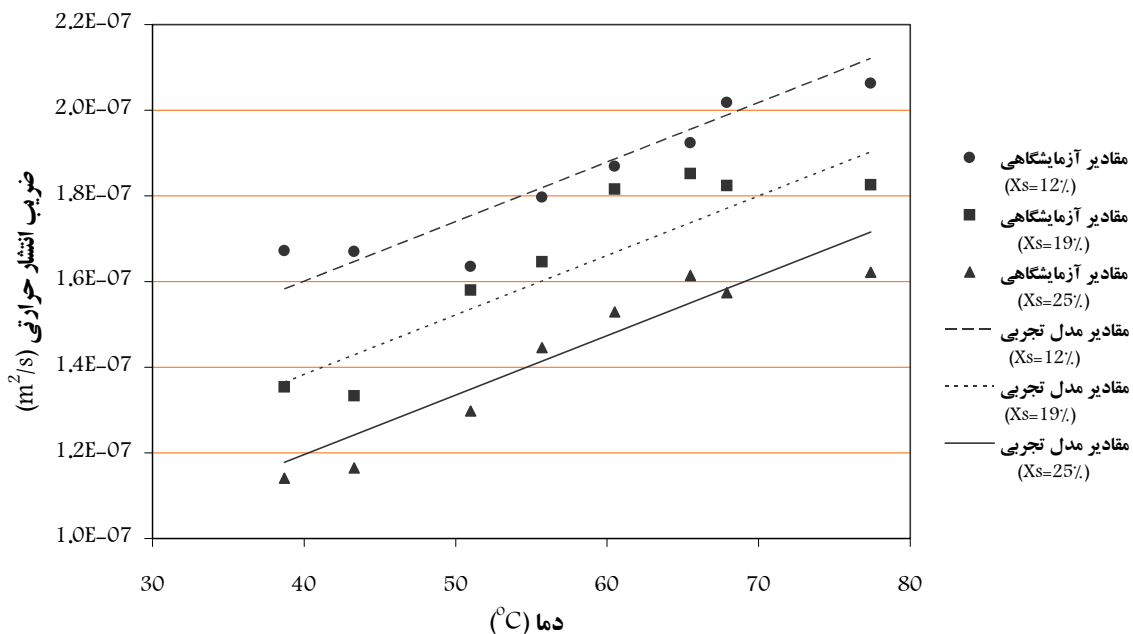
$R^2=0.92$

شکل ۱۳ رابطه ضریب انتشار حرارتی با پارامترهای درصد ماده جامد و دما و همچنین مدل های خطی برازش شده بر داده‌های آزمون را نشان می‌دهد. همچنین در شکل (۱۴) رابطه بین ضریب انتشار حرارتی اندازه‌گیری شده و مدل تجربی قابل مشاهده است.

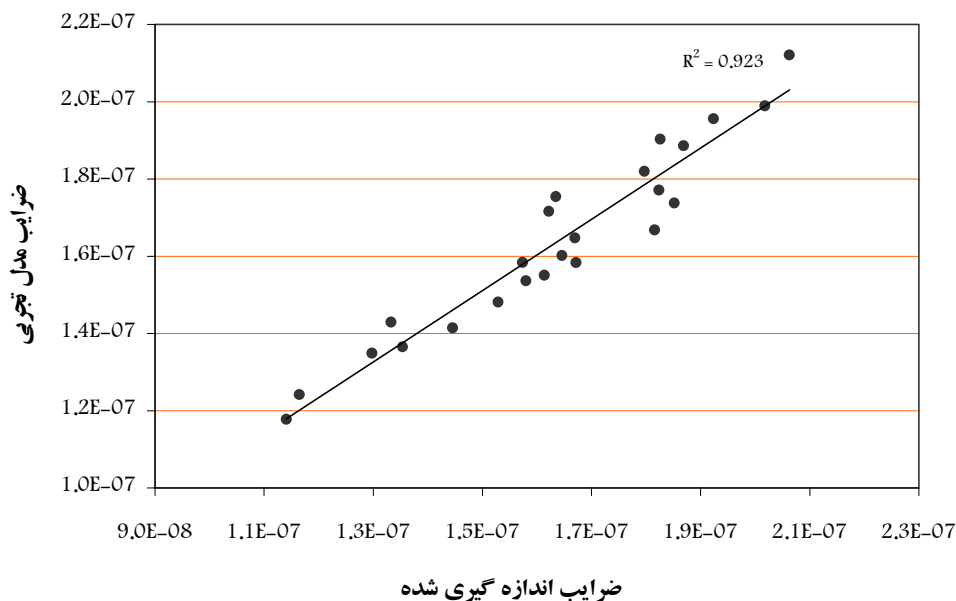
جدول ۵- مقایسه میانگین‌های ضریب انتشار حرارتی $\times 10^7$ (m²/s) آب لیموترش در سطوح مختلف درصد ماده جامد و دما

سطوح دما (°C)								
۷۷/۴	۶۷/۹	۶۵/۵	۶۰/۵	۵۵/۷	۵۱	۴۳/۳	۳۸/۷	
۲/۰۶۳	۲/۰۱۸	۱/۹۲۴	۱/۸۶۹	۱/۷۹۷	۱/۶۳۵	۱/۶۷۰	۱/۶۷۲	۱۲
a	ab	abc	bc	cde	ef	def	def	سطوح درصد ماده جامد (kg/kg)
۱/۸۲۶	۱/۸۲۴	۱/۸۵۲	۱/۸۱۶	۱/۶۴۶	۱/۵۸۰	۱/۳۳۳	۱/۳۵۴	
cd	cd	bc	cd	ef	fg	h	h	۱۹
۱/۶۲۲	۱/۵۷۴	۱/۶۱۴	۱/۵۲۹	۱/۴۴۶	۱/۲۹۸	۱/۱۶۵	۱/۱۴۱	۲۵
f	fg	fg	fg	gh	hi	i	i	

حروف مشابه درجه بندی دانکن نشانگر عدم اختلاف معنی دار بین مقادیر ضریب انتشار حرارتی است



شکل ۱۳- رابطه بین دما و ضریب انتشار حرارتی در درصدهای مختلف ماده جامد



شکل ۱۴- رابطه بین ضریب انتشارحرارتی اندازه گیری شده و مدل تجربی

حجمی کاهش یافته، در حالیکه هدایت حرارتی، گرمای ویژه و ضریب انتشارحرارتی آب لیموترش افزایش می یابد. رابطه بین خواص حرارتی- فیزیکی آب لیموترش و پارامترهای درصد ماده جامد و دما توسط مدل های رگرسیون دو متغیره خطی ارائه گردیده که ضریب تعیین مدل های ارائه شده بیش از ۰/۹۲ است.

پارامترهای درصد ماده جامد و دما بر خواص حرارتی- فیزیکی آب لیموترش تاثیر معنی داری دارند. با افزایش درصد ماده جامد، جرم حجمی افزایش یافته ولی هدایت حرارتی، گرمای ویژه و ضریب انتشار حرارتی آب لیموترش کاهش می یابد. همچنین با افزایش دمای مایع، جرم

REFERENCES

1. Bellet, D., M. Sengelin, & C. Thirriot. 1975. Determination des proprietes thermophysiques de liquides non-newtoniens a l'aide d'une cellule a cylindres coaxiaux. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 18: 1177-1187.
2. Bhowmilk, Santi R. & Kan- Ichi. Hayakawa. 1979. A new method for determining the apparent thermal diffusivity of thermal conductive food. *J. Food Sci.* 44(2): 469-474.
3. Choi, Y. & M. R. Okos. 1983. The thermal properties of tomato juice concentrates. *Trans. ASAE*. 26: 305-311.
4. Constenla, D. T., J. E. Lozano & G. H. Crapiste. 1989. Thermophysical properties of clarified apple juice as a function of concentration and temperature. *J. Food Sci.* 54: 663-668.
5. Demirel, Y. & S.I. Sandler. 2002. Effects of concentration and temperature on the coupled heat and mass transport in liquid mixtures. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 45: 75-86.
6. Dickerson, R.W. 1965. An apparatus for measurement of thermal diffusivity of foods. *Food Technol.* 19: 198-204.
7. Disney, R. W. 1954. The specific heat of some cereal grains. *Cereal Chem.* 31: 229.
8. Hwang, M. P. & K. L. Hayakawa. 1979. A specific heat calorimeter for foods. *J. Food Sci.* 44: 435-438, 448.
9. Kothandaraman, C. P. & S. Subramanyan. 1989. *Heat and mass transfer data book*. 4 th ed. New Delhi, India.
10. Lamb, J. 1976. Influence of water on the thermal properties of foods. *Chem. Ind.* 24: 1046-1048.

11. Miles, C. A., G. Van Beek & C.H. Veerkamp. 1983. Calculation of thermophysical properties of foods. In: R. Jowitt *et al.* (Eds). Physical properties of foods. Applied Science Publishers. London, UK. pp. 269-312.
12. Polley, S. I., O. P. Snyder & P. Kotnour. 1980. A compilation of thermal properties of foods. Food Technol. 34: 76-94.
13. Riedel, L. 1949. Thermal conductivity measurement on sugar solutions, fruit juices and milk. Chemie Ingenieur Technik. 21(17&18): 340-341.
14. Rohsenow, Warren M., James P. Hartnett & Young I. Cho. 1998. Handbook of heat transfer. 3 th ed. Newyork, USA.
15. Saravacos, G. D. & A. E. Kostaropoulos. 1995. Transport properties in processing of fruits and vegetables. Food Technol. 49: 99-109.
16. Shariaty- Niassar, M., M. Hozawa & T. Tsukada. 2000. Development of probe for thermal conductivity measurement of food materials under heated and pressurized conditions. J. Food Eng. 43: 133-139.
17. Singh, R.P. 1982. Thermal diffusivity in food processing. Food Technol. 36: 87-91.
18. Sun, J., J. P. Longtin & T. F. Irvine Jr. 2001. Laser- based thermal pulse measurement of liquid thermophysical properties. Int. J. Heat Mass Transfer. 44: 645-657.
19. Suter, D. A., K. K. Agrawal & B. L. Clary. 1972. Thermal properties of peanut pods, hulls and kernels. Trans. ASAE. 18(2): 370-375.
20. Sweat, V. E. 1995. Thermal properties of foods. In: M. A. Rao and S. S. H. Rizvi (Eds.), Engineering Properties of Foods, 2nd edn. Marcel Dekker, Inc., New york, USA. pp.99-138.
21. Telis- Romero, J., V. R. N. Telis, A. L. Gabas & F. Yamashita. 1998. Thermophysical properties of brazilian orange juice as affected by temperature and water content. J. Food Eng. 38: 27-40.
22. Tserberg, N. V. 1965. Thermal conductivity of gases and liquids. M.I.T. Press, Cambridge, MA, USA.
23. Wang, C. Y. & M. L. Yang. 1995. A new calorimeter for measuring rapidly the thermal conductivity of liquids.
24. Wang, F. A., J. Q. Zhu, H. S. Chen, W. C. Wang and Y. L. Jiang. 2000. A new model of thermal conductivity for liquids. Chem. Eng. J. 78: 187-191.
25. Weast, R. C. 1985. Handbook of chemistry and physics. 66 th ed. CRC Press Inc. Boca Rotan, FL, USA. Thermochemica Acta. 255: 365-370.