

## تأثیر درصد ماده جامد محلول و دما بر خواص حرارتی - فیزیکی آب انار شفاف

امید رضا روستاپور<sup>۱\*</sup>، اکبر جوکار<sup>۲</sup>، حمید رضا گازر<sup>۳</sup> و لادن جوکار<sup>۴</sup>

۱- استادیار موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی فارس.

۲- مربی پژوهشی موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی فارس،

۳- استادیار موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

۴- مربی پژوهشی موسسه اصلاح نهال و بذر، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی فارس

(تاریخ دریافت: ۸۹/۶/۶ تاریخ پذیرش: ۹۰/۴/۵)

### چکیده

تعیین خواص حرارتی- فیزیکی آب انار شامل جرم حجمی، گرمای ویژه و ضریب هدایت حرارتی جهت بررسی، کنترل، پیش بینی و مدلسازی عددی فرآیندهایی از قبیل خشک شدن و تغلیظ ضروری است. این خواص با تغییر درصد ماده جامد و دما تحت تأثیر قرار می گیرند. بنابراین این خواص در سه سطح ماده جامد محلول ۱۲، ۴۰ و ۶۵ درصد و در محدوده دمایی ۲۵ تا ۷۰ °C تعیین گردیدند. ضریب هدایت حرارتی توسط استوانه های هم محور، گرمای ویژه توسط گرماسنج پیمایشی تفاضلی و جرم حجمی توسط پیکنومتر حجمی اندازه گیری شد. نتایج حاصل از تحلیل داده ها نشان می دهد که هم درصد ماده جامد و هم دما بر خواص حرارتی- فیزیکی آب انار تأثیر گذارند ولی تأثیر درصد ماده جامد بیشتر است. با افزایش ماده جامد محلول از ۱۲ به ۶۵ درصد ضریب هدایت حرارتی از ۰/۲۳۳ به ۰/۱۹۳ W/m.°C و گرمای ویژه از ۵/۱۹ به ۳/۳۴ kJ/kg.°C کاهش خواهند یافت در حالی که جرم حجمی روند صعودی داشته و از ۱۰۲۷ به ۱۳۲۳ kg/m<sup>3</sup> افزایش می یابد. از طرفی با افزایش دما از ۳۰ تا ۷۰ °C جرم حجمی از ۱۱۷۳ به ۱۱۵۰ kg/m<sup>3</sup> کاهش یافته ولی ضریب هدایت حرارتی در طی افزایش دما از ۲۸ تا ۴۲ °C از ۰/۱۸۸ به ۰/۲۲۹ W/m.°C افزایش یافته است همچنین روند صعودی گرمای ویژه در طی افزایش دما از ۴۰ تا ۶۰ °C از ۳/۹ به ۴/۴ kJ/kg.°C مشاهده شده است. با تجزیه و تحلیل رگرسیون مدل های تجربی پیش بینی خواص حرارتی- فیزیکی آب انار بر حسب متغیرهای کاری به دست آمد.

کلید واژه گان: گرمای ویژه، ضریب هدایت حرارتی، جرم حجمی، آب انار

## ۱- مقدمه

مطالعه خواص حرارتی- فیزیکی مواد غذایی از قبیل گرمای ویژه، ضریب انتشارحرارتی و جرم حجمی در مهندسی صنایع غذایی ضروری است. ضریب هدایت حرارتی جهت بررسی و کنترل فرآیندهای جابجایی از قبیل عملیات حرارتی و خشک کردن بسیار مهم هستند. مدل سازی، بهینه سازی و خودکار کردن فرآیندهای مواد غذایی به علت پیچیدگی مواد خام تشکیل دهنده محصول که خواص حرارتی- فیزیکی را تحت تاثیر قرار می دهند، مشکل می باشد به علاوه خواص حرارتی- فیزیکی مواد غذایی با تغییر دما و درصد ماده جامد موجود در ماده تغییر اساسی می یابند. در راستای تعیین خواص حرارتی- فیزیکی محصولات کشاورزی و مواد غذایی مطالعات و تحقیقات بسیاری صورت پذیرفته است. محققان مختلف روش هایی را برای اندازه گیری خواص حرارتی- فیزیکی مواد غذایی ارائه داده اند [۱ و ۲].

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 درصد آب و دما دارد [۳].

در تحقیقات انجام شده توسط چوی و اوکوس، هدایت حرارتی و ضریب انتشارحرارتی آب گوجه فرنگی توسط دستگاه پروب با منبع حرارتی خطی و انتقال حرارت گذرا و جرم حجمی آن توسط پیکنومتر در محدوده دمایی ۲۰ تا ۱۵۰ درجه سلسیوس و درصد ماده جامد ۴/۸ تا ۸۰ درصد اندازه گیری گردید. نتایج به دست آمده حاکی از این است که هدایت حرارتی، ضریب انتشارحرارتی 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 [۴].

کانستلا و همکاران خواص فیزیکی- حرارتی آب سیب شفاف در محدوده دمایی ۲۰ تا ۹۰ درجه سلسیوس و درصد ماده جامد محلول ۱۲ تا ۷۰ درجه بریکس اندازه گیری کردند. بر اساس نتایج گرمای ویژه با افزایش درصد ماده جامد بصورت خطی کاهش یافته و با افزایش

دما افزایش می یابد همچنین هدایت حرارتی آب سیب با افزایش درصد ماده جامد به صورت خطی کاهش یافته و با افزایش دما به صورت خطی افزایش می یابد [۵].

دیگرسون ضریب انتشارحرارتی چند ماده غذایی را به روش غیر مستقیم محاسبه نمود منتهی مجموع خطاهای آزمایشی ضرایب اندازه گیری شده باعث افزایش درصد خطای مقادیر این ضریب گردید. ضرایب انتشارحرارتی نیز با اندازه گیری مستقیم آن ها با استفاده از یک محفظه استوانه ای<sup>۱</sup> و به شیوه انتقال حرارت گذرا با درصد خطای کمتر تعیین گردید. همچنین سینگ با استفاده از این روش ضریب انتشار حرارتی تعدادی از مواد غذایی را با درصد خطای کم به دست آورد [۲ و ۶].

خواص حرارتی- فیزیکی آب پرتقال در محدوده دمایی ۰/۵ تا ۶۲ درجه سلسیوس و میزان آب ۳۴ تا ۷۳ درصد تعیین و مدل های رگرسیونی خطی مناسبی برای پیش بینی خواص ذکر شده ارائه شده است. با افزایش دما و درصد آب موجود در آب پرتقال، گرمای ویژه، هدایت حرارتی و ضریب انتشارحرارتی افزایش ولی جرم حجمی کاهش یافته است همچنین درصد آب تاثیر بیشتری بر خواص ذکر شده در مقایسه با دما دارد [۷].

شریعتی- نیاسر و همکاران هدایت حرارتی ژل نشاسته سیب زمینی را در محدوده دمایی ۲۵ تا ۸۰ درجه سلسیوس با روش سیم داغ، رطوبت ۵۰ تا ۸۰ درصد و فشار ۱۰-۰/۲ MPa اندازه گیری کردند. براساس نتایج بدست آمده هدایت حرارتی با افزایش درجه حرارت و درصد رطوبت افزایش یافته و با افزایش فشار تا ۱ MPa افزایش می یابد. در فشارهای بالاتر، هدایت حرارتی تقریباً ثابت می ماند [۸].

ضرایب هدایت حرارتی و انتشارحرارتی مایعات گلیسرول، پروپانول، متانول و اتانول به روش اندازه گیری پالس حرارتی توسط لیزر<sup>۲</sup> تعیین گردید. مقادیر به دست آمده توافق خوبی با مقادیر ارائه شده استاندارد دارد [۹].

هدایت حرارتی آب لیموترش توسط استوانه های هم محور، گرمای ویژه توسط کالریمتر پیمایشی تفاضلی، جرم حجمی

1. Cylindrical cell

2. Laser-based thermal pulse technique

نتایج حاکی از تاثیر بیشتر درصد رطوبت نسبت به دما بر این خواص می باشد [۱۴].

در تحقیق حاضر ضریب هدایت حرارتی، گرمای ویژه و جرم حجمی آب انار وارپته رباب<sup>۱</sup> در دماها و درصد ماده جامد مختلف تعیین و مدل های تجربی جهت بررسی همبستگی بین ضرایب نامبرده با پارامترهای دما و درصد ماده جامد ارائه شده است.

#### نمادها

$\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$	c	گرمای ویژه (در فشار ثابت)
$\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$	k	ضریب هدایت حرارتی
m	L	طول استوانه های هم محور
kW	q1	اتلاف حرارتی
m	r1	شعاع داخلی لایه مایع در فضای بین دو استوانه
m	r2	شعاع خارجی لایه مایع در فضای بین دو استوانه
$^\circ\text{C}$	T1	دمای لایه داخلی مایع محبوس
$^\circ\text{C}$	T2	دمای لایه خارجی مایع محبوس
$^\circ\text{C}$	Tm	دمای متوسط لایه مایع
-	Xs	درصد ماده جامد محلول
$\text{kg/m}^3$	$\rho$	جرم حجمی

## ۲- مواد و روش ها

ماده اولیه آب میوه انار رباب به عنوان وارپته غالب در استان فارس، بوده و زمان برداشت متداول این میوه در شرایط رسیدگی کامل، در ماه های مهر و آبان می باشد. خواص حرارتی- فیزیکی این محصول در محدوده ماده جامد محلول (بریکس) ۱۲ تا ۶۵ درصد و دمای ۳۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس بررسی شده و انتخاب این محدوده دمایی براساس شرایط دمایی عملیات حرارتی فرایند تغلیظ انجام شده است. در فرایند تغلیظ آب انار با ماده جامد محلول حدود ۱۲ درصد، شامل قندهای فروکتوز و گلوکز و

توسط پیکنومتر و انتشار حرارتی از رابطه بین سه خواص یاد شده تعیین گردید. ضرایب هدایت حرارتی، گرمای ویژه و انتشار حرارتی با افزایش دما و کاهش درصد ماده جامد افزایش یافته است. در حالیکه جرم حجمی آب با افزایش دما و همچنین کاهش درصد ماده جامد، کاهش یافته است [۱۰].

هدایت حرارتی و گرمای ویژه شیر نارگیل به ترتیب با روش سیم داغ و گرماسنج پیمایشی تفاضلی در محدوده دمایی ۶ تا ۸۰ درجه سلسیوس و چربی ۲۰ تا ۳۵ درصد اندازه گیری شد. بر اساس نتایج به دست آمده کاهش درصد چربی و افزایش دما باعث افزایش این خواص گردیده اند [۱۱].

کومبرا و همکاران جرم حجمی، گرمای ویژه و هدایت حرارتی محصولات مایع تخم مرغ شامل سفیده، زرده و مخلوطی از آنها را در محدوده دمایی ۲۷۳ تا ۳۱۱ کلوین و درصد آب ۵۱/۸ تا ۸۸/۲ درصد تعیین کرده و مدل های رگرسیونی چند جمله ای خطی را برای نشان دادن تاثیر دما و درصد آب بر این خواص ارائه دادند. بر اساس نتایج، جرم حجمی از ۱۰۲۳ تا ۱۱۴۳/۵  $\text{kg/m}^3$ ، گرمای ویژه از ۲/۶ تا ۳/۷  $\text{J/g} \cdot \text{K}$  و هدایت حرارتی از ۰/۲ تا ۰/۶  $\text{W/m} \cdot \text{K}$  برای زرده خلص تا سفیده خاص در محدوده های دمایی و رطوبی یاد شده تغییر کرده اند [۱۲].

هدایت حرارتی چند ماده غذایی مایع شامل آب سیب، روغن کلزا، عسل و شربت ذرت با درصد فروکتوز بالا در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و فشار ۰/۱ تا ۷۰۰ MPa اندازه گیری و تعیین شد. بر اساس نتایج، با افزایش فشار ضریب هدایت حرارتی کلیه مواد افزایش یافته است. بطوریکه آب سیب دارای بیشترین هدایت حرارتی (۰/۸  $\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ ) و روغن کلزا دارای کمترین مقدار این ضریب (۰/۲۹  $\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ ) در فشار ۷۰۰ MPa می باشند [۱۳].

بان و همکاران جرم حجمی، گرمای ویژه و هدایت حرارتی گوشت میوه انبه را در رطوبت های ۰/۵۲ و ۰/۹  $\text{kg/kg}$  و در دماهای ۲۰ و ۸۰ درجه سلسیوس تعیین کردند. و مدل های رگرسیونی خطی برای نشان دادن روند تغییرات این خواص با دما و رطوبت را به دست آوردند.

1. Rabab

و در ظرف دیگر ماده مینا که یاقوت کبود<sup>۲</sup> می‌باشد، مستقر شده و سپس درب ظرف‌ها بسته و تحت عملیات حرارتی قرار می‌گیرند. واحد ثبت‌کننده سیستم، تغییرات انرژی حرارتی ماده اصلی و ماده مینا را در یک محدوده دمایی اندازه‌گیری و میزان انرژی حرارتی جذب یا دفع شده توسط ماده اصلی را محاسبه می‌نماید.

به منظور اندازه‌گیری گرمای ویژه آب انار، ابتدا دستگاه کالریمتر با تلونن کالیبره می‌شود. برای این منظور در ظرف نمونه تلونن ریخته شده و در محدوده دمایی ۴۰ تا ۶۰ درجه سلسیوس تغییرات گرمای ویژه آن بررسی و تعیین گردید. با مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده توسط کالریمتر و مقادیر استاندارد گرمای ویژه تلونن [۱۶] 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. بعد از کالیبره کردن کالریمتر نسبت به بررسی و تعیین گرمای ویژه آب انار در سه سطح ماده جامد محلول ۱۲، ۴۰ و ۶۵ درصد و سه سطح دما در محدوده ۴۰ تا ۶۰ درجه سلسیوس اقدام گردید. این کالریمتر قادر به اندازه‌گیری گرمای ویژه در دماهای کمتر از ۴۰ درجه سلسیوس نبود. با توجه به منحنی کالیبراسیون و داشتن مقادیر خطا در هر دما می‌توان به مقادیر واقعی گرمای ویژه در هر دما دست یافت. آزمایشات در طی سه تکرار انجام شد و انحراف معیار اعداد ۰/۸۱۹۷ به دست آمد.

## ۲-۲- تعیین هدایت حرارتی آب انار

هدایت حرارتی آب انار توسط دستگاه آزمایشگاهی استوانه‌های هم محور<sup>۳</sup> اندازه‌گیری و تعیین گردید. این دستگاه شامل دو لوله از جنس آلیاژ فسفر-برنز به طول ۲۱۰ میلی‌متر و ضخامت یکسان ۶ میلی‌متر می‌باشد. دو لوله استوانه‌ای به صورت هم محور مونتاژ شده و طرفین آن‌ها مسدود شده است. مایع مورد نظر در فضای خالی بین دو استوانه تزریق شده و تشکیل یک لایه نازک با ضخامت ۲ میلی‌متر را می‌دهد. در جداره داخلی لوله با قطر کوچکتر یک گرم‌کن برقی قرار دارد و گرمای اولیه لازم را فراهم می‌آورد. در جداره هر لوله یک حسگر دما قرار دارد.

اسیدهای مالیک و سیتریک می‌باشد. مواد تشکیل دهنده آب انار در جدول (۱) داده شده است [۱۵]. برای انجام آزمایش‌ها، کنسانتره آب انار با ماده جامد محلول ۶۵ درصد از کارخانه مزرعه سبز نی‌ریز خریداری شده و سپس با رقیق سازی آن توسط آب مقطر، دو سطح دیگر درصد ماده جامد، ۴۰ و ۱۲ به دست آمد. درصد ماده جامد محلول نمونه‌های به دست آمده توسط رفرکتومتر مشاهده شد. آب انار رباب طبیعی دارای ماده جامد محلول حدود ۹ تا ۱۲ درصد می‌باشد. آزمایش‌های اندازه‌گیری خواص حرارتی- فیزیکی در سه سطح ماده جامد محلول و حداکثر پنج سطح دما طی سه تکرار انجام شد. نتایج با استفاده از طرح آماری کاملاً تصادفی در قالب فاکتوریل تجزیه و تحلیل گردید. در نهایت مدل‌های رگرسیونی یک متغیره جهت بررسی تأثیر هر یک از پارامترهای درصد ماده جامد محلول و دما و مدل‌های رگرسیونی دو متغیره جهت بررسی تأثیر توأم این پارامترها بر خواص حرارتی- فیزیکی آب انار به دست آمدند.

جدول ۱ اجزاء تشکیل دهنده آب انار

جزء	مقدار (g/100g)
فروکتوز	۶/۶۳
گلوکز	۶/۶۲
اسید سیتریک	۱/۲۴
اسید مالیک	۰/۰۵۳
پتاسیم	۰/۲۴۷۶

## ۲-۱- تعیین گرمای ویژه آب انار

گرمای ویژه آب انار توسط گرماسنج (کالریمتر) پیمایشی تفاضلی<sup>۱</sup> 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 را در محدوده دمایی ۱۷۰- تا ۷۷۰ درجه سلسیوس اندازه‌گیری می‌نماید. اساس کار روش فوق اندازه‌گیری تغییرات دمایی خیلی کوچک در ماده طی فرآیند حرارتی می‌باشد. این کالریمتر دارای دو ظرف به حجم ۲ میلی‌لیتر بوده که در داخل یکی از آن‌ها نمونه ماده

2. Sapphire

3. Co-axial cylinder heat conductivity

1. Differential scanning calorimeter (DSC)

## ۲-۳- تعیین جرم حجمی آب انار توسط

### پیکنومتر حجمی

با استفاده از یک پیکنومتر حجمی<sup>۲</sup> ۵۰ میلی لیتری جرم حجمی آب انار اندازه گیری شد. برای اندازه گیری جرم حجمی، پیکنومتر از مایع مورد نظر پر شده و سپس توسط ترازوی دقیق توزین و مقدار جرم حجمی محاسبه گردید. با استقرار پیکنومتر حاوی مایع در حمام هم دما<sup>۳</sup> و تنظیم دمای گرم کن آن در نقطه مورد نظر، تعیین جرم حجمی در آن دما امکان پذیر خواهد بود. ابتدا پیکنومتر با استفاده از مایع تلون در محدوده دمایی ۳۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس کالیبره شده و سپس نسبت به اندازه گیری جرم حجمی آب انار اقدام گردید. با داشتن مقادیر استاندارد جرم حجمی تلون در دماهای مختلف [۱۶] و با اندازه گیری جرم حجمی تلون توسط پیکنومتر، میزان خطای پیکنومتر در دماهای مختلف به دست آمد. نتایج حاکی از این است که مقادیر جرم حجمی اندازه گیری شده از مقادیر استاندارد جرم حجمی کمتر بوده که به علت عدم دقت پیکنومتر می باشد لذا در هر دما انحراف از مقدار استاندارد جرم حجمی بایستی به مقدار جرم حجمی اندازه گیری شده توسط پیکنومتر افزوده گردد. جرم حجمی آب انار در سه سطح ماده جامد محلول ۱۲، ۴۰ و ۶۵ درصد و پنج سطح دما در محدوده ۳۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس اندازه گیری شد. با اضافه کردن مقادیر خطا در هر دما به مقادیر جرم حجمی به دست آمده توسط پیکنومتر در هر دما می توان مقادیر واقعی جرم حجمی در هر حالت را به دست آورد. آزمایشات در طی ۳ تکرار انجام شد و انحراف معیار اعداد ۱۲۷/۰۳ به دست آمد.

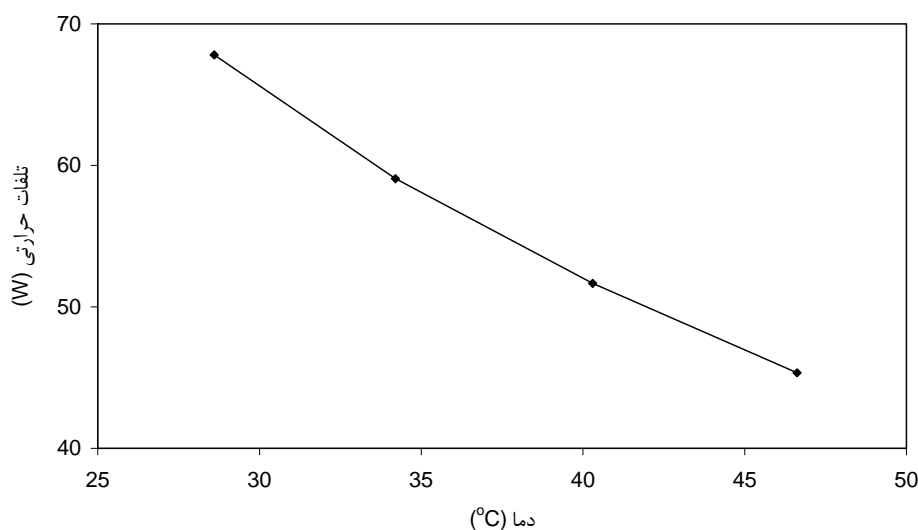
خروجی این حسگرها به یک دیتالاگر منتقل شده و تغییرات دما در زمان مشاهده می گردد. قبل از شروع آزمایشها ابتدا بایستی نسبت به کالیبراسیون دستگاه اقدام شود. برای این منظور مایع تلون در فضای محبوس بین دو لوله دستگاه تزریق شده و پس از استقرار آن در حمام هم دما، گرم کن روشن گردید. پس از رسیدن دستگاه به حالت پایا<sup>۱</sup> دماهای طرفین لایه مایع ثبت شد و با توجه به ابعاد دستگاه و مقدار هدایت حرارتی مایع تلون در متوسط دماهای ثبت شده، مقدار انرژی حرارتی مصرفی با استفاده از رابطه (۱) محاسبه گردید. اختلاف بین انرژی مورد نیاز گرم کن (۳ W) و انرژی مصرفی در حالت پایا، تلفات حرارتی سیستم (q<sub>L</sub>) می باشد. شکل ۱ تلفات حرارتی در دماهای مختلف نشان می دهد.

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

بعد از انجام کالیبراسیون دستگاه و تعیین تلفات حرارتی در دماهای مختلف به بررسی ضرایب هدایت حرارتی آب انار پرداخته شد. آزمایشهای اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی در سه سطح ماده جامد محلول ۱۲، ۴۰ و ۶۵ درصد و چهار سطح دمای ایجاد شده توسط گرم کن دستگاه استوانه های هم محور در محدوده ۳۰ تا ۶۰ درجه سلسیوس انجام گردید. ضریب هدایت حرارتی به کمک رابطه (۱)، با داشتن مقدار توان حرارتی مصرفی، به دست می آید. در واقع این مقدار، به عنوان ضریب هدایت حرارتی آب انار در متوسط دمای لایه مایع محسوب می گردد. هدایت حرارتی آب انار در سطوح مختلف ماده جامد محلول، در سه سطح دمای متوسط لایه مایع محصور شده در بین دو استوانه هم محور دستگاه گزارش شد. آزمایشات در طی سه تکرار انجام شد و انحراف معیار اعداد ۰/۰۲۶ به دست آمد.

1. Volumetric Pycnometer  
2. Isothermal bath

1. Steady state



شکل ۱ مقادیر تلفات حرارتی در متوسط دماهای مختلف لایه مایع در استوانه‌های هم‌محور

جامد محلول ۱۲ درصد (آب انار طبیعی) یک رابطه خطی با ضریب تبیین،  $R^2 = 0.875$ ، و برای ماده جامد محلول ۴۰ درصد رابطه لگاریتمی با ضریب تبیین ۰/۷۱۱ و برای ماده جامد حلال ۶۵ درصد (آب انار کنسانتره تولیدی توسط کلیه کارخانه‌ها) یک رابطه لگاریتمی با ضریب تبیین حدود ۰/۶۰ می‌باشند. شکل ۲ تغییرات گرمای ویژه با دما در درصد‌های مختلف ماده جامد و منحنی‌های برازش شده تجربی را نشان می‌دهد.

$$c = 0.024T + 0.399 \quad R^2 = 0.875, X_s = 12$$

$$c = 1.75 \ell T - 2.668 \quad R^2 = 0.711, X_s = 40$$

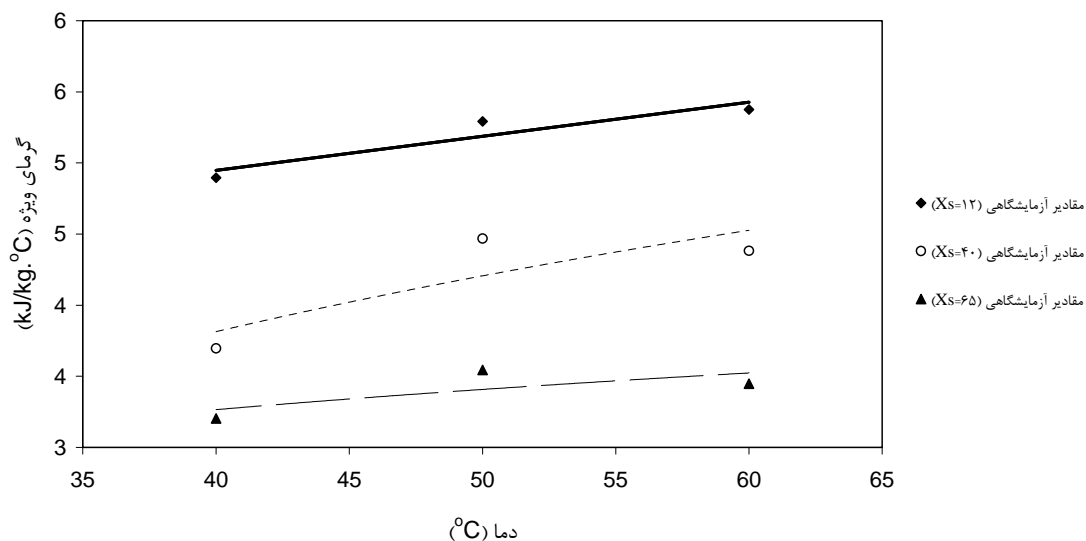
$$c = 0.636 \ell T + 0.920 \quad R^2 = 0.60, X_s = 65$$

(۲)

### ۳- نتایج و بحث

گرمای ویژه با افزایش درصد ماده جامد محلول از ۱۲ تا ۶۵ کاهش و با افزایش دما از ۴۰ تا ۶۰ درجه سلسیوس افزایش یافته است. با افزایش دما شار حرارتی عبوری از ماده افزایش می‌یابد و در نتیجه گرمای ویژه افزایش خواهد یافت. نظر به اینکه گرمای ویژه آب نسبت به بقیه مواد جامد تشکیل دهنده آب انار بیشتر است لذا با افزایش درصد ماده جامد موجود در ماده و به عبارتی کاهش درصد آب گرمای ویژه کاهش می‌یابد. انحراف معیار داده‌های گرمای ویژه ۰/۸۱۹۷ گردیده است.

تغییرات گرمای ویژه آب انار با دما در مقادیر مختلف درصد ماده جامد محلول با استفاده از مدل‌های رگرسیونی یک متغیره مناسب نشان داده شده است (رابطه ۲). بهترین رابطه جهت برازش تغییرات گرمای ویژه با دما برای ماده



شکل ۲ تغییرات گرمای ویژه با دما (مقادیر آزمایشگاهی و مدل تجربی)

" $\beta$ " حاکی از این است که افزایش یک درصدی ماده جامد محلول، کاهش حدود ۰/۹۵ درصدی گرمای ویژه را دربردارد در حالی که افزایش یک درصدی دما باعث افزایش حدود ۰/۲۵ درصدی گرمای ویژه را به دنبال خواهد داشت (جدول ۲).

مدل رگرسیونی به دست آمده جهت برآزش رابطه بین گرمای ویژه آب انار با فاکتورهای درصد ماده جامد محلول و دما، یک مدل خطی دو متغیره بوده که با اطمینان ۹۹ درصد معنی دار و ضریب تبیین آن،  $R^2 = 0.958$  است و اشاره بر این دارد که مدل برآزش شده ۹۵/۸ درصد تغییرات گرمای ویژه را بیان می کند. ضرایب استاندارد

جدول ۲ ضرایب همبستگی مدل رگرسیونی گرمای ویژه

$F_s(0.99)$	آزمون t	ضریب استاندارد ( $\beta$ )	ضرایب معادله	
۰/۰۰۰۱	۱۰/۴۹۱**	-	۴/۴	ضریب ثابت
۰/۰۰۰۱	۱۱/۲۷۰**	-۰/۹۴۷	-۰/۰۳۴	درصد ماده جامد محلول
۰/۰۲۵	۲/۹۵۴*	۰/۲۴۸	۰/۰۲۳	دما

\*\* وجود اختلاف معنی دار در سطح ۱٪

\* وجود اختلاف معنی دار در سطح ۵٪

وابسته درصد ماده جامد محلول ( $X_s$ ) و دما (T) به صورت رابطه (۳) می باشد:

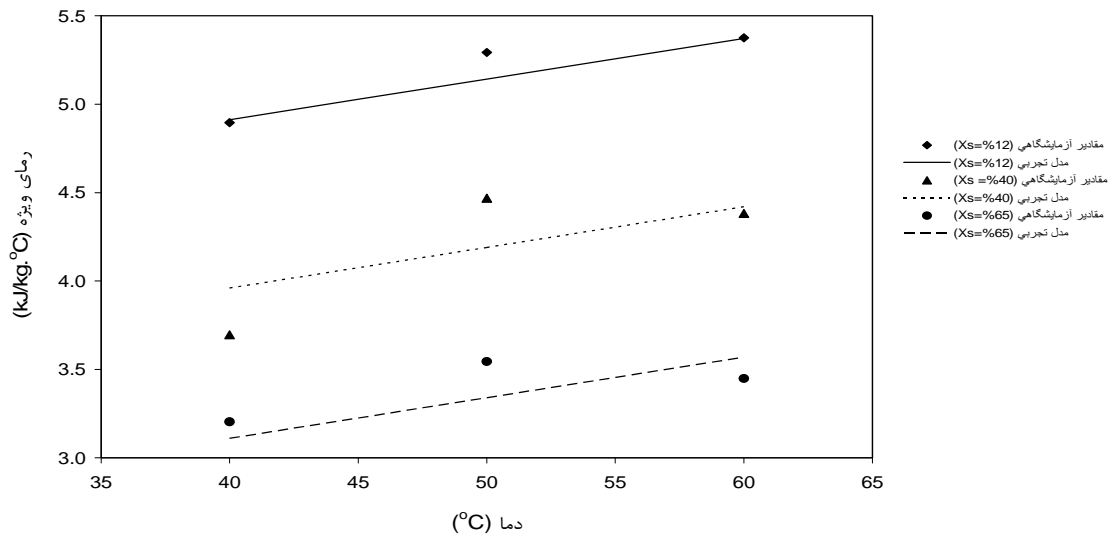
$$c = 4.4 - 0.034X_s + 0.023T \quad R^2 = 0.958 \quad (3)$$

شکل ۳ تغییرات گرمای ویژه آب انار با پارامترهای درصد ماده جامد و دما و همچنین مدل خطی گذرانده شده بر داده های آزمون را نشان می دهد. روند تغییرات گرمای ویژه

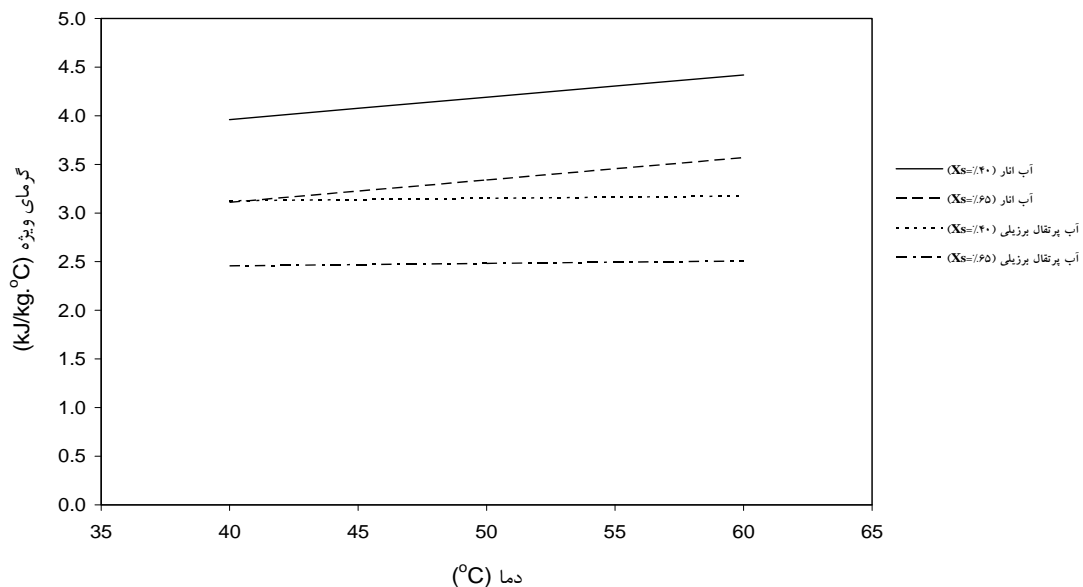
درصد ماده جامد محلول با اطمینان ۹۹ درصد تاثیر معنی داری بر گرمای ویژه آب انار داشته، ولی دما تاثیر کمتری و با احتمال ۹۵ درصد تاثیر معنی داری بر گرمای ویژه آب انار دارد (جدول ۲). رابطه خطی به دست آمده بین متغیر مستقل گرمای ویژه آب انار (c) و متغیرهای

این تحقیق برای آب انار، با مدل به دست آمده توسط تلیس- رومرو و همکاران برای آب پرتقال برزیلی، مقایسه گردیده است. همانطور که مشاهده می گردد روند تغییرات تقریباً مشابه بوده است. افزایش گرمای ویژه در هردو محصول با افزایش دما مشاهده می گردد. همچنین این ضریب با افزایش ماده جامد، کاهش یافته است.

آب انار با دما و درصد ماده جامد مشابه نتایج به دست آمده توسط تلیس- رومرو و همکاران که گرمای ویژه آب پرتقال برزیلی را در محدوده دمایی ۰/۵ تا ۶۲ درجه سلسیوس و در ماده جامد محلول ۲۷ تا ۶۶ درصد تعیین نموده اند، می باشد [۷]. روند تغییرات گرمای ویژه آب پرتقال برزیلی توسط یک مدل رگرسیونی چند جمله ای خطی نشان داده شده است. در شکل ۴ مدل به دست آمده



شکل ۳ همبستگی تغییرات گرمای ویژه آب انار با دما و ماده جامد محلول



شکل ۴ مقایسه مدل های همبستگی گرمای ویژه آب انار و آب پرتقال برزیلی در سطوح مختلف دما و ماده جامد

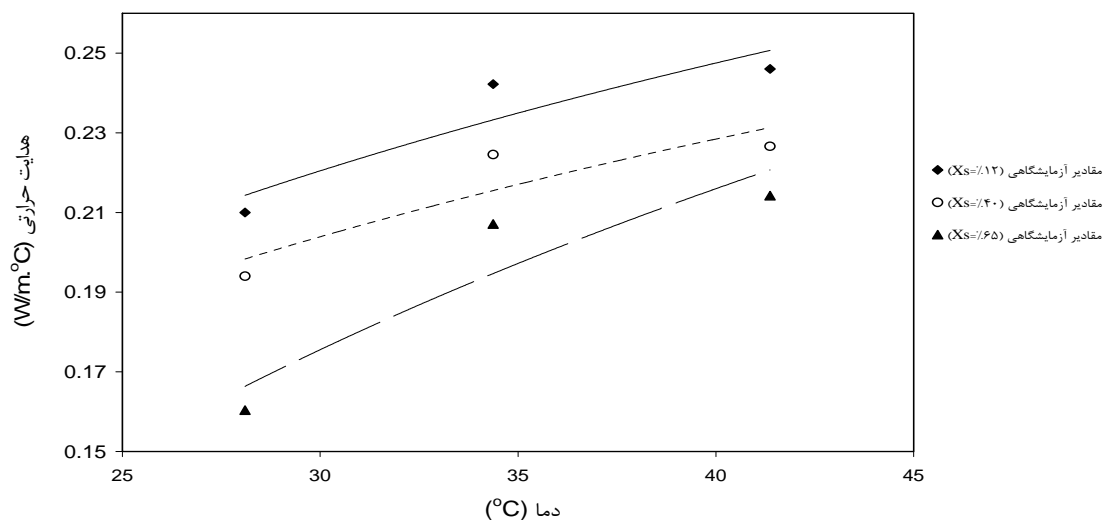


یک متغیره مناسب نشان داده شده است (رابطه ۴). بهترین روابط جهت برازش تغییرات هدایت حرارتی آب انار با دما، برای ماده جامد محلول ۱۲، ۴۰ و ۶۵ درصد روابط لگاریتمی با ضرایب تبیین،  $R^2$  به ترتیب ۰/۸۱۷، ۰/۸۴۶ و ۰/۸۶۴ می‌باشند. شکل ۵ تغییرات هدایت حرارتی با دما در درصدهای مختلف ماده جامد و منحنی‌های برازش شده تجربی را نشان می‌دهد.

$$k=0.094/T-0.099 \quad R^2=0.846, X_s=12$$

$$k=0.085/T-0.086 \quad R^2=0.817, X_s=40 \quad (4)$$

$$k=0.140/T-0.302 \quad R^2=0.864, X_s=65$$



شکل ۵ تغییرات ضریب هدایت حرارتی با دما (مقادیر آزمایشگاهی و مدل تجربی)

را بیان می‌کند. ضرایب استاندارد " $\beta$ " حاکی از این است که افزایش یک درصدی ماده جامد محلول، کاهش حدود ۰/۶۴ درصدی هدایت حرارتی را دربر دارد در حالی که افزایش یک درصدی دما، افزایش حدود ۰/۶۷ درصدی هدایت حرارتی را به دنبال خواهد داشت (جدول ۳).

ضریب هدایت حرارتی با افزایش دمای متوسط لایه نازک آب انار مستقر شده در فضای بین دو استوانه دستگاه، از ۲۸ تا ۴۲ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد زیرا شار حرارتی عبوری از ماده افزایش یافته و در نتیجه هدایت حرارتی افزایش می‌یابد. از طرفی این ضریب با افزایش درصد ماده جامد محلول آب انار از ۱۲ تا ۶۵ کاهش یافته است. با توجه به اینکه هدایت حرارتی آب نسبت به مواد جامد موجود در آب انار بیشتر است لذا با کاهش درصد آب، هدایت حرارتی آب انار کاهش می‌یابد. انحراف معیار داده‌های هدایت حرارتی ۰/۰۲۶ گردیده است. تغییرات هدایت حرارتی آب انار با دما در مقادیر مختلف درصد ماده جامد محلول با استفاده از مدل‌های رگرسیونی

مدل رگرسیونی جهت برازش رابطه بین هدایت حرارتی آب انار با فاکتورهای درصد ماده جامد محلول و دما، یک مدل خطی دو متغیره بوده که با اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار و ضریب تبیین آن،  $R^2$ ، ۰/۸۶۲ است و اشاره بر این دارد که مدل برازش شده ۸۶/۲ درصد تغییرات هدایت حرارتی

جدول ۳ ضرایب همبستگی مدل رگرسیونی هدایت حرارتی

$F_s(0/99)$	آزمون t	ضریب استاندارد ( $\beta$ )	ضرایب معادله	
0/002	5/504**	-	0/138	ضریب ثابت
0/005	4/425**	-0/644	-0/001	درصد ماده جامد محلول
0/005	4/403**	0/668	0/003	دما

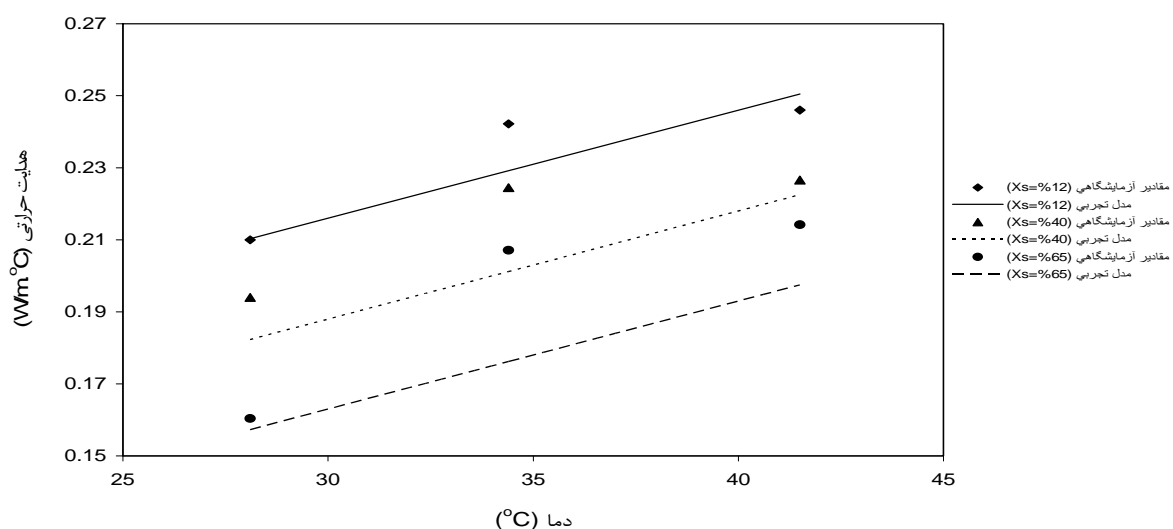
\*\* وجود اختلاف معنی دار در سطح ۱٪

در ماده جامد ۱۲ تا ۲۵ درصد تعیین نموده‌اند، می‌باشد [۱۰]. رابطه همبستگی تغییرات هدایت حرارتی آب لیموترش توسط یک مدل رگرسیونی چند جمله‌ای خطی نشان داده شده است. در شکل ۷ مدل به دست آمده این تحقیق برای آب انار، با مدل به دست آمده برای آب لیموترش در ماده جامد ۱۲ درصد مقایسه گردیده است. همانطور که مشاهده می‌گردد روند تغییرات تقریباً مشابه بوده است. به طوری که با افزایش دما ضریب هدایت حرارتی هر دو محصول افزایش یافته است. مقایسه نتایج حاصل از مقایسه مدل‌های خطی رگرسیونی به دست آمده این تحقیق و تحقیق انجام شده توسط تلیس- رومرو و همکاران که ضریب هدایت حرارتی آب پرتقال برزیلی را در محدوده دمایی ۰/۵ تا ۶۲ درجه سلسیوس و در ماده جامد محلول ۲۷ تا ۶۶ درصد تعیین نموده‌اند [۷]، نشانگر روند تغییرات مشابه می‌باشد (شکل ۸).

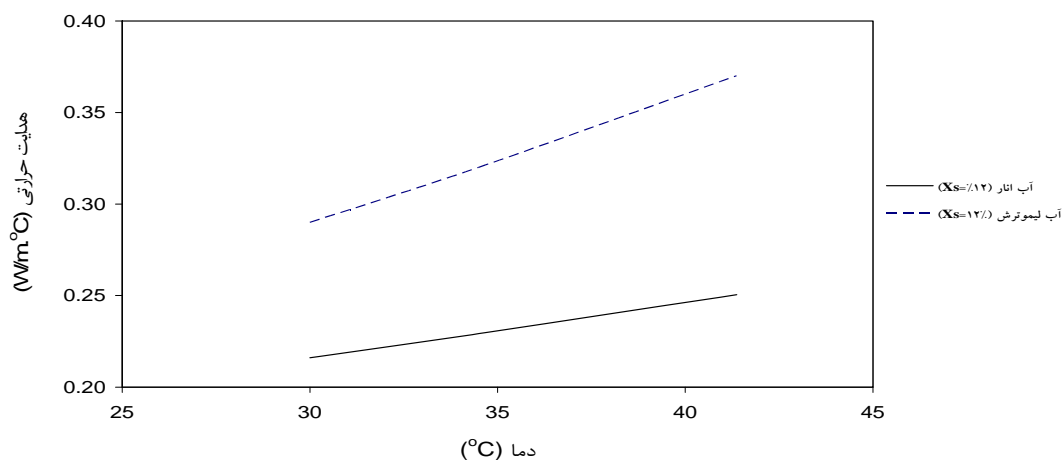
نتایج به دست آمده از تحلیل رگرسیونی هدایت حرارتی آب انار حاکی از این است که درصد ماده جامد و دما با اطمینان ۹۹ درصد تأثیر معنی داری بر هدایت حرارتی دارند (جدول ۳). رابطه خطی به دست آمده بین متغیر مستقل ضریب هدایت حرارتی آب انار ( $k$ ) و متغیرهای وابسته درصد ماده جامد محلول ( $X_s$ ) و دما ( $T$ ) به صورت رابطه (۵) می‌باشد:

$$k = 0.138 - 0.001X_s + 0.003T \quad R^2 = 0.862 \quad (5)$$

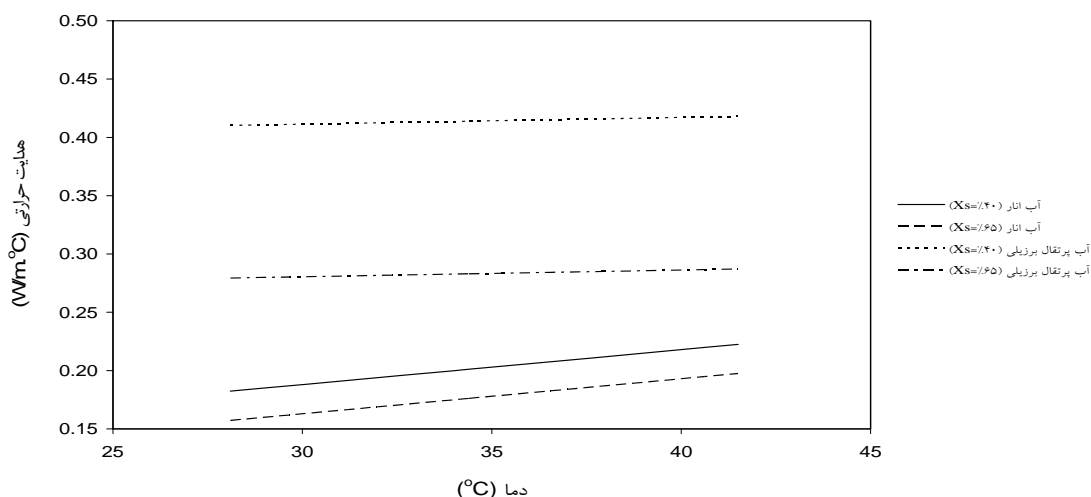
شکل ۶ تغییرات ضریب هدایت حرارتی با پارامترهای درصد ماده جامد و دما و همچنین مدل خطی گذرانده شده بر داده‌های آزمون را نشان می‌دهد. روند تغییرات هدایت آب انار با دما و درصد ماده جامد مشابه نتایج به دست آمده توسط روستاپور و همکاران که هدایت حرارتی آب لیموترش را در محدوده دمایی ۳۰ تا ۷۷ درجه سلسیوس و



شکل ۶ همبستگی تغییرات هدایت حرارتی با دما و درصدهای مختلف ماده جامد محلول



شکل ۷ مقایسه مدل‌های همبستگی ضریب هدایت حرارتی آب انار و آب لیموترش در سطوح مختلف دما



شکل ۸ مقایسه مدل‌های همبستگی ضریب هدایت حرارتی آب انار و آب پرتقال برزیلی در سطوح دما و ماده جامد

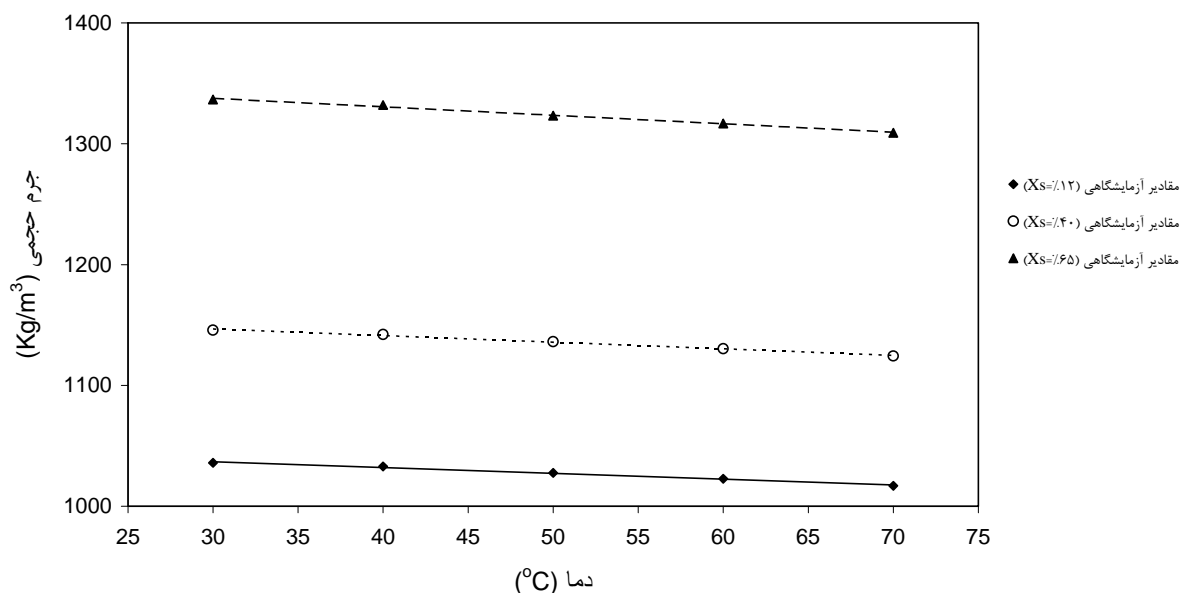
یک متغیره مناسب نشان داده شده است (رابطه ۶). بهترین روابط جهت برازش تغییرات جرم حجمی آب انار با دما برای ماده جامد ۱۲، ۴۰ و ۶۵ درصد، روابط خطی با ضرایب تبیین،  $R^2$ ، به ترتیب ۰/۹۹۰، ۰/۹۹۳ و ۰/۹۹۲ می‌باشند. شکل ۹ تغییرات جرم حجمی با دما در درصدهای مختلف ماده جامد و منحنی‌های برازش شده تجربی را نشان می‌دهد.

$$\rho = -0.48T + 10512 \quad R^2 = 0.990, X_s = 12$$

$$\rho = -0.544T + 1163 \quad R^2 = 0.993, X_s = 40 \quad (6)$$

$$\rho = -0.702T + 13586 \quad R^2 = 0.992, X_s = 65$$

بر اساس نتایج به دست آمده جرم حجمی آب انار با افزایش ماده جامد محلول از ۱۲ تا ۶۵ درصد افزایش و با افزایش دما از ۳۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس کاهش خواهد یافت. با افزایش دما، آب انار مستقر شده در پیکنومتر انبساط یافته و از درب پیکنومتر سرریز می‌شود. بنابراین، وزن نهایی مایع و پیکنومتر کاهش می‌یابد و در نتیجه جرم حجمی کاهش می‌یابد. همچنین افزایش درصد ماده جامد باعث افزایش تمرکز ماده جامد در واحد حجم می‌شود. انحراف معیار داده‌های جرم حجمی ۱۲۷/۰۳ گردیده است. تغییرات جرم حجمی آب انار با دما در مقادیر مختلف درصد ماده جامد محلول با استفاده از مدل‌های رگرسیونی



شکل ۹. تغییرات جرم حجمی با دما (مقادیر آزمایشگاهی و مدل تجربی)

که مدل برازش شده ۹۶/۶ درصد تغییرات جرم حجمی را بیان می‌کند. ضرایب استاندارد " $\beta$ " حاکی از این است که با افزایش یک درصد ماده جامد محلول، حدود ۰/۹۸ درصد به جرم حجمی اضافه می‌شود ولی افزایش یک درصدی دما، کاهش اندک ۰/۰۶۶ درصدی جرم حجمی را در بر خواهد داشت (جدول ۴).

معیار بهترین مدل برازش یا رابطه‌ای که با اطمینان زیاد روابط بین متغیرها را با هم نشان دهد، ضریب همبستگی بین آن‌ها است. مدل رگرسیونی به دست آمده یک مدل خطی دو متغیره می‌باشد که با اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار و ضریب تبیین آن،  $R^2$ ، ۰/۹۶۶ است و اشاره بر این دارد

جدول ۴. ضرایب همبستگی مدل رگرسیونی جرم حجمی

$F_s(0/99)$	آزمون t	ضریب استاندارد ( $\beta$ )	ضرایب معادله	
۰/۰۰۰۱	۳۶/۴۰۰**	-	۹۴۷/۱۷۵	ضریب ثابت
۰/۰۰۰۱	۱۸/۳۹۹**	۰/۹۸۱	۵/۵۵۹	درصد ماده جامد محلول
۰/۲۳۷	-۱/۲۴۵ <sup>ns</sup>	-۰/۰۶۶	-۰/۵۷۶	دما

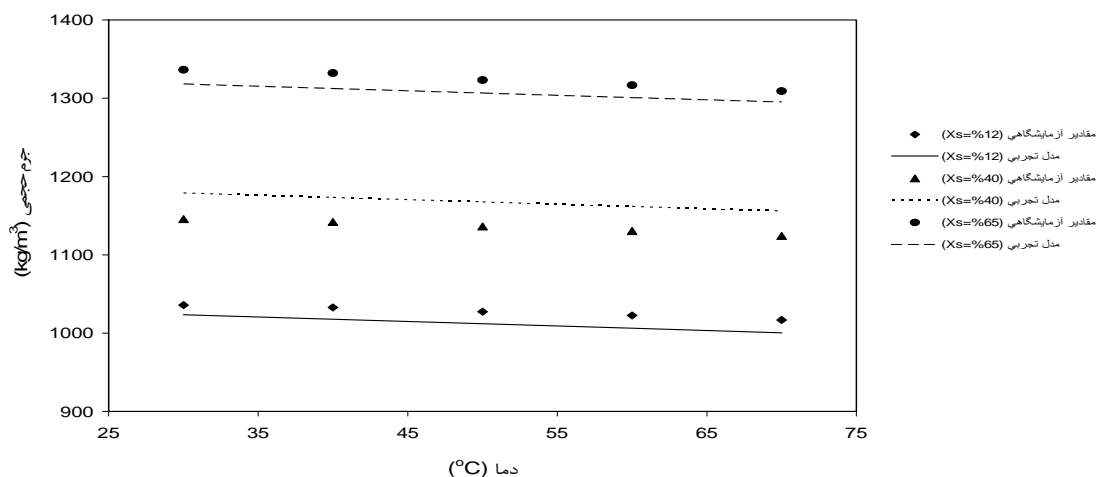
\*\* وجود اختلاف معنی‌دار در سطح ۱٪

<sup>ns</sup> عدم وجود اختلاف معنی‌دار

$$\rho = 947.175 + 5.559X_s - 0.567T \quad R^2 = 0.966 \quad (7)$$

شکل ۱۰ تغییرات جرم حجمی آب انار با پارامترهای درصد ماده جامد و دما و همچنین مدل خطی گذرانده شده بر داده‌های آزمون را نشان می‌دهد.

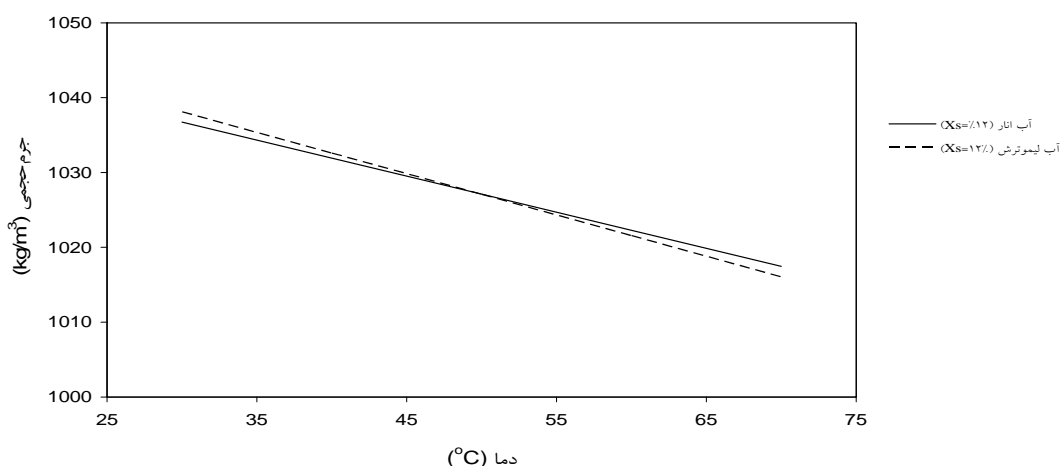
بر اساس نتایج، درصد ماده جامد محلول با اطمینان ۹۹ درصد تاثیر معنی‌داری بر جرم حجمی آب انار داشته ولی دما تاثیر معنی‌داری ندارد (جدول ۴). رابطه خطی به‌دست آمده بین متغیر مستقل جرم حجمی آب انار ( $\rho$ ) و متغیرهای وابسته درصد ماده جامد محلول ( $X_s$ ) و دما ( $T$ ) به‌صورت رابطه (۷) می‌باشد:



شکل ۱۰ همبستگی تغییرات جرم حجمی با دما و درصدهای مختلف ماده جامد محلول

جرم حجمی هر دو محصول افزایش یافته است. همچنین تفاوت معنی داری بین مقادیر جرم حجمی این دو محصول وجود ندارد زیرا جرم حجمی صرفاً تابع درصد ماده جامد بوده و نوع ترکیبات تشکیل دهنده محصول تاثیری بر این خاصیت ندارند. مقایسه نتایج حاصل از مقایسه مدل‌های خطی رگرسیونی به دست آمده این تحقیق و تحقیق انجام شده توسط تلیس-رومرو و همکاران که جرم حجمی آب پرتقال برزیلی را در محدوده دمایی ۰/۵ تا ۶۲ درجه سلسیوس و در ماده جامد محلول ۲۷ تا ۶۶ درصد تعیین نموده‌اند [۷]، نشانگر روند تغییرات مشابه بوده است.

روند تغییرات جرم حجمی آب انار با دما و درصد ماده جامد مشابه نتایج به دست آمده توسط روستاپور و همکاران که جرم حجمی آب لیموترش را در محدوده دمایی ۳۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس و در ماده جامد ۱۲ تا ۲۵ درصد تعیین نموده‌اند، می‌باشد [۱۰]. رابطه همبستگی تغییرات هدایت حرارتی آب لیموترش توسط یک مدل رگرسیونی چند جمله‌ای خطی نشان داده شده است. در شکل ۱۱ مدل رگرسیونی به دست آمده برای آب لیموترش در ماده جامد ۱۲ درصد مقایسه گردیده است. همانطور که مشاهده می‌گردد روند تغییرات تقریباً مشابه بوده است. به طوریکه با افزایش دما



شکل ۱۱ مقایسه مدل‌های همبستگی جرم حجمی آب انار و آب لیموترش در سطوح مختلف دما

function of concentration and temperature. J. Food Science. 54: 663-668.

[6] Dickerson, R.W. 1965. An apparatus for measurement of thermal diffusivity of foods. Food Technology. 19: 198-204.

[7] Telis-Romero, J., Telis, V. R. N., Gabas, A. L. and Yamashita, F. 1998. Thermophysical properties of Brazilian orange juice as affected by temperature and water content. Journal of Food Engineering. 38: 27-40.

[8] Shariaty-Niassar, M., M. Hozawa and T. Tsukada. 2000. Development of probe for thermal conductivity measurement of food materials under heated and pressurized conditions. Journal of Food Engineering. 43: 133-139.

[9] Sun, J., Longtin, J. P. and Irvine Jr, T. F. 2001. Laser-based thermal pulse measurement of liquid thermophysical properties. International Journal of Heat and Mass Transfer. 44: 645-657.

[10] Roustapour, O.R., Ghobadian, B., Khoshtaghaza, M.H. and Fakhrpour, Gh. 2005. Determination of Thermophysical Properties of Lime Juice. Iranian Journal of Agricultural Science. 36(4): 833-848. (in Farsi)

[11] Tansakul, A. and Chaisawang, P. 2006. Thermophysical properties of coconut milk. Journal of Food Engineering. 73: 276-280.

[12] Jane S.R., Coimbra, J.S.R., Gabas, A.L., Minim, L.A., Garcia Rojas, E.E., Telis, V.R.N. and Telis-Romero, J. 2006. Density, heat capacity and thermal conductivity of liquid egg products. Journal of Food Engineering. 74: 186-190.

[13] Ramaswamy, R., Balasubramaniam, V.M. and Sastry, S.K. 2007. Thermal conductivity of selected liquid foods at elevated pressures up to 700 MPa. Journal of Food Engineering. 83: 444-451.

[14] Bon, J., Vaquiro, H., Benedito, J. and Telis-Romero, J. 2010. Thermophysical properties of mango pulp (*Mangifera indica* L. cv. Tommy Atkins). Journal of Food Engineering. 97: 563-568.

[15] AOAC. 1990. Official methods of analysis (15<sup>th</sup> Edn). Association of Official Analytical Chemists. Washington DC, USA.

[16] Rohsenow, W. M., Hartnett, J. P. and Cho, Y. I. 1998. Handbook of heat transfer. 3<sup>th</sup> ed. Newyork, USA

#### ۴- نتیجه گیری

نتایج حاصل از بررسی اثرات درصد ماده جامد و دما بر خواص حرارتی- فیزیکی آب انار نشان می‌دهد که پارامترهای ذکر شده تاثیر معنی‌داری بر این خواص دارند. با افزایش درصد ماده جامد، هدایت حرارتی و گرمای ویژه کاهش یافته، ولی جرم حجمی آب انار افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش دمای لایه مایع، هدایت حرارتی و گرمای ویژه افزایش یافته، در حالیکه جرم حجمی آب انار کاهش می‌یابد. رابطه بین خواص حرارتی- فیزیکی آب انار و پارامترهای درصد ماده جامد و دما توسط مدل‌های رگرسیون دو متغیره خطی ارائه گردیده که ضریب تبیین ( $R^2$ ) مدل‌های ارائه شده برای گرمای ویژه و جرم حجمی حدود ۹۶ درصد و برای هدایت حرارتی حدود ۸۶ درصد است.

#### ۵- قدردانی

از شرکت مزرعه سبزی‌ریز فارس بابت تهیه و تحویل مواد اولیه و از آقای مهندس قاسم فخرپور بابت همکاری در انجام آزمایش‌های اندازه‌گیری گرمای ویژه آب انار توسط دستگاه گرماسنج پیمایشی تفاضلی، سپاسگذاری می‌شود.

#### ۶- منابع

- [1] Mohsenin, N.N. 1980. Thermal properties of foods and agricultural materials. Gordon and Breach Science Publishers. New York.
- [2] Singh, R.P. 1982. Thermal diffusivity in food processing. Food Technology. 36: 87-91.
- [3] Polley, S. I., Snyder, O. P. and Kotnour, P. 1980. A compilation of thermal properties of foods. Food Technology. pp. 76-94.
- [4] Choi, Y. and Okos, M. R. 1983. The thermal properties of tomato juice concentrates. Transactions of the ASAE. 26: 305-311.
- [5] Constenla, D. T., Lozano, J. E. and Crapeste, G. H. 1989. Thermophysical properties of clarified apple juice as a

## Effects of concentration and temperature on the thermophysical properties of Clarified Pomegranate Juice

Roustapour, O. R. <sup>1\*</sup>, Joukar, A. <sup>2</sup>, Gazor, H. R. <sup>3</sup>, Joukar, L. <sup>4</sup>

1- Assistant Professor, Agricultural Engineering Research Institute, Fars Center for Agriculture Research and Natural Resources.

2- Research Instructor, Agricultural Engineering Research Institute, Fars Center for Agriculture Research and Natural Resources.

3- Assistant professor, Agricultural Engineering Research Institute, Karaj, Iran.

4- Research Instructor, Seed and Plant Research Institute, Fars Center for Agriculture Research and Natural Resources

(Received:89/6/6 Accepted: 90/4/5)

Determination of thermo-physical properties of pomegranate juice is necessary to control processes such as drying and concentration. These properties have been affected by soluble solid content and temperature. Therefore the properties including; density, specific heat and thermal conductivity were determined at three levels of soluble solid content, 12°, 40° and 65° Brix and temperature range from 25 to 70 °C. Thermal conductivity by co-axial cylinder apparatus, specific heat by differential scanning calorimeter and density by a volumetric pycnometer were measured. Regression analysis indicated that both soluble solid content and temperature affected on these properties but the soluble solid content has more influence. Increase of soluble solid content from 12 to 65 caused a decrease in thermal conductivity from 0.233 to 0.193 W/m.°C, specific heat from 5.19 to 3.34 kJ/kg.°C and an increase in density from 1027 to 1323 kg/m<sup>3</sup> respectively. With increase in temperature from 30 to 70 °C, density decrease from 1173 to 1150 kg/m<sup>3</sup> but thermal conductivity increase from 0.188 to 0.229 W/m.°C during temperature increasing from 28 to 42 °C and specific heat increase from 3.9 to 4.4 kJ/kg during temperature increasing from 40 to 60 °C. With regression analysis, the suitable empirical models of thermophysical properties of pomegranate juice with operating variables were obtained.

**Keywords:** Specific heat, Thermal conductivity, Density, Pomegranate juice

---

\* Corresponding Author E-mail address: roustapour@farsagres.ir