

برازش بی‌درنگ مقدار ژلاتینه‌شدن نشاسته برنج نیم‌جوش بر اساس خواص فیزیکی - الکتریکی شلتوک طی غوطه‌وری (مطالعه موردی: رقم شیروودی)

ابراهیم تقی نژاد^{۱*}، ولی رسولی شریانی^۲

۱- استادیار دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی مغان، رشته مهندسی مکانیک بیوسیستم

۲- استادیار دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، گروه مهندسی بیوسیستم

(تاریخ دریافت: ۹۶/۱۰/۲۰ تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۳/۰۷)

چکیده

مرحله‌ی غوطه‌وری از مهم‌ترین مراحل فرآیند نیم‌جوش کردن شلتوک است که نیازمند کنترل دقیق می‌باشد؛ زیرا ذرات نشاسته، طی آن ژلاتینه می‌گردد. اندازه‌گیری درجه ژلاتینه‌شدن نشاسته برنج با استفاده از دستگاه کالری‌متر تفاضلی، روش پر هزینه بوده و داده‌های آن به‌صورت بی‌درنگ قابل‌استفاده نیست. بنابراین در مطالعه حاضر یک رابطه‌ی ریاضی بین درجه ژلاتینه‌شدن نشاسته برنج با خواص فیزیکی (رطوبت شلتوک) - الکتریکی (هدایت الکتریکی و ولتاژ خروجی حسگر خازنی آب شلتوک) طی مرحله‌ی غوطه‌وری فرآیند نیم‌جوش کردن تدوین شد. برای اندازه‌گیری خواص الکتریکی آب شلتوک، یک سامانه آزمایشگاهی گرمایش‌آمی و حسگر خازنی به ترتیب برای اندازه‌گیری هدایت الکتریکی و ولتاژ طراحی و ساخته شد. برای اجرای آزمایش، شلتوک (رقم شیروودی) با غوطه‌وری در دمای ۶۰، ۶۵ و ۷۰°C نیم‌جوش شده بود. در هر دما، نمونه‌ی شلتوک و آب شلتوک در ۵ زمان غوطه‌وری متفاوت برداشته شد. نتایج آزمایش نشان داد که مقادیر رطوبت شلتوک (۲۱/۱۸ تا ۳۵/۱٪ بر پایه تر)، هدایت الکتریکی (۰/۶۳ تا ۱/۶ ms/cm) و ولتاژ خروجی حسگر خازنی (۲۱۶ تا ۵۹۵ mV) آب شلتوک و درصد ژلاتینه‌شدن نشاسته برنج (۵/۵ تا ۳۱/۷٪) به‌طور معنی‌دار ($P < 0.05$) و به ترتیب با معادله‌ی نمایی ($R^2 > 0.98$)، نمایی ($R^2 > 0.93$)، درجه دوم ($R^2 > 0.95$) و نمایی ($R^2 > 0.96$) طی غوطه‌وری افزایش یافت. یک رابطه خطی بین درجه ژلاتینه‌شدن نشاسته برنج و خواص فیزیکی - الکتریکی آب شلتوک برآزش گردید. نتایج نشان داد که هدایت الکتریکی آب شلتوک توانست با کمترین خطای رگرسیونی، مقدار ژلاتینه‌شدن نشاسته برنج طی غوطه‌وری را پیش‌بینی کند.

کلید واژگان: برنج نیم‌جوش، حسگر خازنی، رقم شیروودی، مقدار ژلاتینه‌شدن نشاسته، هدایت الکتریکی

*مسئول مکاتبات: e.taghinezhad@uma.ac.ir

۱- مقدمه

نیم جوش کردن یک فرایند هیدروگرمایی است که شامل تیمار آبی و حرارتی بر شلتوک قبل از عملیات خشک کردن و تبدیل آن به برنج سفید است. این فرآیند دارای سه مرحله اصلی غوطه وری، بخاردهی و خشک کردن است [۱]. در مرحله‌ی غوطه‌وری، شلتوک به نسبت ۱/۵ تا ۲ برابر با آب مخلوط می‌شود [۲]. هر دو شرایط غوطه‌وری و بخاردهی اثر شدیدی بر اندازه تورم ذرات^۱ نشاسته و درجه ژلاتینه شدن نشاسته دارند. ژلاتینه شدن شامل تغییرات برگشت‌ناپذیر از جمله اتلاف شکست مضاعف^۲ و ذوب بلوره^۳ است [۳، ۴]. طی غوطه‌وری، دانه‌های برنج آب جذب می‌کنند و ذرات نشاسته درون دانه برنج متورم می‌شوند. بنابراین درجه ژلاتینه شدن نشاسته، فضاهای خالی و شکاف‌های موجود در دانه را تعیین می‌کند؛ در نتیجه شرایط نیم‌جوش کردن موجب افزایش یا کاهش راندمان برنج سالم می‌گردد [۵، ۶]. برای دستیابی به ماکزیم راندمان برنج سالم، درجه ژلاتینه شدن در مرحله‌ی غوطه‌وری، حداکثر ۴۰٪ مورد نیاز است [۵، ۷، ۸]. بنابراین تعیین درجه ژلاتینه شدن نشاسته برنج در فرآیند نیم‌جوش کردن از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. تورم ذرات نشاسته طی ژلاتینه شدن موجب افزایش ویسکوزیته محلول نشاسته و در نتیجه تغییر خواص دی‌الکتریک و هدایت الکتریکی آن خواهد شد [۹، ۱۰]. خواص دی‌الکتریک، یکی از مهم‌ترین خواص الکتریکی محصولات کشاورزی و مواد غذایی می‌باشد که با استفاده از حسگرهای خازنی قابل محاسبه است [۱۱]. استفاده از حسگرهای خازنی، به عنوان یک فناوری جدید، کم‌هزینه، سریع و غیرمخرب برای سنجش خواص کمی و کیفی محصولات کشاورزی، مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است [۱۲-۱۶]. *Dunlap and Makower* (۱۹۴۵)، رابطه‌ی ثابت دی‌الکتریک و هدایت الکتریکی هویج در رطوبت، ابعاد و بسامدهای مختلف را مورد بررسی قرار دادند [۱۷]. آن‌ها بیان کردند که تا رطوبت ۸٪ مقدار ثابت دی‌الکتریک ثابت بوده و بعد از آن به سرعت افزایش یافت. محققان دیگری، تأثیر رطوبت ذرت [۱۸]، نخود و لوبیا

چشم‌بلبلی [۱۹]، آرد شاه‌بلوط [۲۰]، دو رقم شلتوک [۲۱] را بر خواص دی‌الکتریک مورد بررسی قرار داده‌اند و نشان داده‌اند که رطوبت به‌طور معنی‌داری بر مقدار ثابت دی‌الکتریک اثرگذار است. *Ragni* و همکاران (۲۰۰۶)، پارامترهای کیفی تخم‌مرغ را با استفاده از خواص خازنی آن پیش‌بینی کردند [۲۲]. آن‌ها با استفاده از یک خازن صفحه-موازی مستطیلی مقادیر ولتاژ را به دست آوردند. همچنین آن‌ها با استفاده از ولتاژ و جرم تخم‌مرغ مدل‌های رگرسیونی خوبی را استخراج کردند. بنابراین از حسگرهای خازنی می‌توان به عنوان یک روش غیر مخرب و ارزان در صنعت غذایی استفاده کرد [۲۱].

تاکنون چندین روش برای اندازه‌گیری ژلاتینه شدن نشاسته سیب زمینی و ذرت بر اساس خواص مختلف از جمله خواص حرارتی با استفاده از کالری متر تفاضلی [۲۳]، تغییر در خواص نوری و میکروسکوپ الکترونی [۲۴] و استفاده از پراش اشعه X [۲۵] استفاده شده است. چندین محقق خواص دی‌الکتریک نشاسته را طی ژلاتینه شدن به روش‌های مختلف مورد بررسی قرار داده‌اند [۲۶-۲۹]. خواص دی‌الکتریک محلول نشاسته ذرت در دمای بین ۴۰ °C تا ۹۰ °C و در محدوده فرکانس ۱۵MHz تا ۳GHz اندازه‌گیری شد [۹]. آن‌ها بیان کرده‌اند که با افزایش غلظت نشاسته، ثابت دی‌الکتریک کاهش و ضریب تلفات افزایش خواهد یافت.

اندازه‌گیری هدایت الکتریکی روشی نوین است که در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. محققان زیادی هدایت الکتریکی سوسپانسیون‌های مختلف نشاسته به آب [۳۰]، قطعه‌های مختلف هویج در محلول نشاسته [۳۱]، پوره میوه هلو و زردآلو [۳۲]، شش نوع آب‌میوه مختلف (سیب قرمز، سیب زرد، هلو، گلابی، آناناس و توت‌فرنگی) [۳۳]، آب دریا [۳۴]، نشاسته برنج، ذرت، سیب‌زمینی و گندم [۳۵]، سبوس برنج [۳۶]، نشاسته گندم [۳۷]، نشاسته ذرت [۳۸]، شلتوک رقم فجر [۱۰ و ۳۹] و برنج در حال پخت [۴۰، ۴۱] را مورد بررسی قرار داده‌اند. *Taghinezhad* و همکاران (۲۰۱۶a)، رابطه‌ی بین خواص فیزیکی (محتوای رطوبت) - الکتریکی (هدایت الکتریکی آب شلتوک) شلتوک رقم فجر را مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۰]. آن‌ها بیان کرده‌اند که مقدار هدایت الکتریکی با خطای کمتری توانست

1. Granules swelling
2. Loss of birefringence
3. Crystallite melting
4. Head rice yield

های شلتوک بلافاصله پس از تهیه، تمیز شده و کاه و کلش‌های آن جدا شدند. میزان رطوبت اولیه شلتوک توسط آون در دمای 103°C به مدت ۷۲ ساعت اندازه‌گیری شد [۴۳].

۲-۲- غوطه‌وری شلتوک

مراحل مختلف فرآیند نیم‌جوش کردن عبارت‌اند از: ۱- غوطه‌وری (خیساندن)، ۲- بخار دهی (یختن)، ۳- خشک‌کردن. برای غوطه‌وری شلتوک از مخزن ساخته‌شده به همراه سامانه کنترل دما (با دقت $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$) استفاده شد. در هر مرحله، ۱ کیلوگرم شلتوک به نسبت ۱/۵ تا ۲ برابر با آب مخلوط می‌شود [۲، ۷]. دمای آب باید حداقل ۵ درجه کمتر از دمای ژلاتینه شدن نشاسته برنج باشد و به طور معمول دمای ۶۰ تا 70°C برای غوطه‌وری انتخاب می‌گردد [۲، ۴۴]. بنابراین در این پژوهش دمای غوطه‌وری ۶۰، ۶۵ و 70°C انتخاب شد.

۲-۳- اندازه‌گیری خاصیت رطوبتی - الکتریکی

شلتوک و درصد ژلاتینه شدن نشاسته برنج طی غوطه‌وری

در پژوهش حاضر خاصیت فیزیکی مربوط به اندازه‌گیری رطوبت شلتوک و خاصیت الکتریکی مربوط به اندازه‌گیری ولتاژ حاصل از حسگر خازنی و هدایت الکتریکی آب شلتوک^۲ طی دما و زمان-های مختلف غوطه‌وری است. سطوح مختلف دما و زمان غوطه‌وری در جدول (۱) نشان داده شده است. مطابق جدول (۱)، اندازه‌گیری خواص فیزیکی - الکتریکی شلتوک و درصد ژلاتینه شدن نشاسته‌ی برنج نیم‌جوش، در ۳ سطح دمای غوطه‌وری (۶۰، ۶۵ و 70°C) و ۵ سطح زمانی از کل زمان غوطه‌وری، در ۳ تکرار انجام شد [۵، ۴۵]. با توجه به پیش‌آزمایشی که برای اندازه‌گیری رطوبت شلتوک طی زمان‌های مختلف غوطه‌وری (هر 15 min) صورت گرفت. نتایج نشان داد که رطوبت شلتوک طی غوطه‌وری به صورت لگاریتمی تغییر می‌یابد، بنابراین سطوح زمانی برای آزمایش به صورت لگاریتمی انتخاب گردید. همچنین کل زمان غوطه‌وری، مدت زمانی است که محتوای رطوبت شلتوک به ۳۵٪ بر پایه‌ی تر برسد.

درجه ژلاتینه شدن نشاسته برنج رقم فجر را پیش‌بینی کند. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته مشخص شد که تاکنون اندازه‌گیری ولتاژ خروجی حسگر خازنی و هدایت الکتریکی آب شلتوک رقم شیروودی طی غوطه‌وری فرآیند نیم‌جوش کردن برای پیش‌بینی درجه ژلاتینه شدن نشاسته برنج، توسط هیچ محقق‌گزارش نشده است.

همان‌طور که درصد ژلاتینه شدن با استفاده از دستگاه کالری متر تفاضلی (DSC) به دست می‌آید [۴۲]. اما اندازه‌گیری درصد ژلاتینه شدن با استفاده از دستگاه کالری متر تفاضلی، هزینه‌بردار بوده و خروجی دستگاه به صورت بی‌درنگ قابل استفاده نیست. همچنین در مرحله غوطه‌وری فرآیند نیم‌جوش کردن، نشاسته برنج باید تا مقدار معینی ژلاتینه گردد. بنابراین در راستای این تحقیق با ارائه‌ی مدلی مناسب بین درصد ژلاتینه شدن نشاسته برنج (رقم شیروودی) و خواص فیزیکی - الکتریکی (رطوبت-هدایت الکتریکی و ولتاژ خروجی یک حسگر خازنی) آب شلتوک در دما و زمان‌های مختلف غوطه‌وری، پیش‌بینی می‌شود که بتوان برای اولین دفعه، درصد ژلاتینه شدن نشاسته برنج (رقم شیروودی) را به روشی غیر مخرب، ارزان و به صورت بی‌درنگ پیش‌بینی کرد. در نتیجه با اندازه‌گیری بی‌درنگ درصد ژلاتینه شدن نشاسته برنج، زمان موردنیاز برای فرآیند غوطه‌وری شلتوک کنترل خواهد شد تا احیاناً شلتوک از حد مورد نیاز، کمتر و بیشتر غوطه‌ور نگردد، وگرنه ممکن است که اثر سوئی بر خواص کیفی و همچنین کاهش راندمان تبدیل برنج داشته باشد. بنابراین نتایج این تحقیق را می‌توان در طراحی سامانه بی‌درنگ برای اندازه‌گیری مقدار ژلاتینه شدن نشاسته برنج طی غوطه‌وری فرآیند نیم‌جوش کردن شلتوک رقم شیروودی مورد استفاده قرارداد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تهیه نمونه و تعیین میزان رطوبت

برای اجرای این پژوهش، شلتوک رقم شیروودی از مزرعه تحقیقاتی موسسه تحقیقات برنج کشور در آمل تهیه‌گردید. نمونه-

۲. منظور از آب شلتوک، آبی است که شلتوک در آن طی دمای مشخص غوطه‌ور شده و با گذشت زمان غوطه‌وری، خواص الکتریکی آن تغییر می‌یابد.

Table 1 Various levels of soaking temperature and time for measuring physical and electrical properties

Soaking times (min)				Soaking temperature (°C)	
240	120	60	30	15	60
180	97	52	28	15	65
120	71	42	25	15	70

سامانه‌ی گرمایش اهمی شامل تغییردهنده‌ی ولتاژ، سلول اهمی، واحد داده‌برداری، دماسنج، رایانه، الکترودها و سیم‌های رابط است. برای اندازه‌گیری هدایت الکتریکی، نمونه‌ها در سلول اهمی ریخته شده و از اتصال منبع تغذیه AC به الکترودهای سلول تا رسیدن دمای نمونه به ۹۰ °C استفاده می‌شد [۳۵]. جریان، دما و هدایت الکتریکی هر ۵۰۰ms طی گرمایش اهمی ثبت می‌گردد.

۲-۳-۳-اندازه‌گیری ولتاژ خروجی حسگر خازنی

برای سنجش ظرفیت خازنی آب شلتوک، یک سامانه الکترونیک مطابق شکل (۲) ساخته شده است. سامانه شامل بدنه، منبع تغذیه، واحد تولید سیگنال، حسگر خازنی، میکروکنترلر، مبدل و کامپیوتر می‌باشد [۴۷]. صفحات خازنی از جنس آلومینیوم با ضخامت ۲mm و قطر ۵۶mm انتخاب گردید به دلیل اینکه آلومینیوم کمترین انحراف در میدان مغناطیسی را ایجاد می‌کند [۱۳]. به منظور عدم تماس صفحات خازنی با قسمت‌های دیگر و قرارگیری آب شلتوک در بین صفحات از سلول اهمی استفاده شده است. مطابق شکل (۲) سلول اهمی از یک لوله‌ی توخالی پلی اتیلن، به طول ۱۴۰mm، قطر داخلی ۵۶mm و قطر خارجی ۱۰۰mm ساخته شد. در قسمت میانی از طول لوله، یک سوراخ به قطر ۲۴mm برای ریختن آب شلتوک در سلول اهمی ایجاد گردید. تویی‌ها با قطر خارجی ۱۲۰mm به دو طرف لوله‌ی توخالی به طول ۴۰mm از هر طرف پیچ شده و با استفاده از حلقه‌ی آب‌بند لاستیکی به قطر خارجی ۵۶mm موجب درزبندی سامانه می‌شود. یک سوراخ طولی در مرکز تویی‌ها برای اتصال میله به صفحات خازنی ایجاد گردید. صفحات با استفاده از چسب حرارتی به تویی‌ها متصل شده‌اند.

۲-۳-۱- اندازه‌گیری رطوبت شلتوک

رطوبت شلتوک در دمای ۶۰ تا ۷۰ °C طی غوطه‌وری مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. مقدار رطوبت شلتوک طی غوطه‌وری بعد از خشک کردن رطوبت سطحی نمونه‌ها توسط دستمال کاغذی، مطابق استاندارد جهانی غلات اندازه‌گیری شد [۴۳]. در نهایت زمان مورد نیاز برای رسیدن رطوبت شلتوک رقم شیروودی به ۳۵٪ بر پایه تر برای سطوح مختلف دمای غوطه‌وری (دماهای ۶۰، ۶۵ و ۷۰ °C) به دست آمد.

۲-۳-۲- اندازه‌گیری هدایت الکتریکی آب شلتوک

هدایت الکتریکی عکس مقاومت یک ماده در مقابل عبور جریان الکتریکی از داخل دیواره مولکولی آن هست؛ که مطابق شکل (۱) با استفاده از حرارت مستقیم اهمی و طبق رابطه (۱) به دست می‌آید [۴۶]:

$$\sigma = \frac{l \times I}{V \times A} \quad (1)$$

σ: هدایت الکتریکی (mS/m)، ولتاژ V، و ولتاژ I، شدت جریان I، (A)، فاصله بین الکترودها (mm) و A: مساحت مقطع مؤثر الکترودها (m²) می‌باشند.

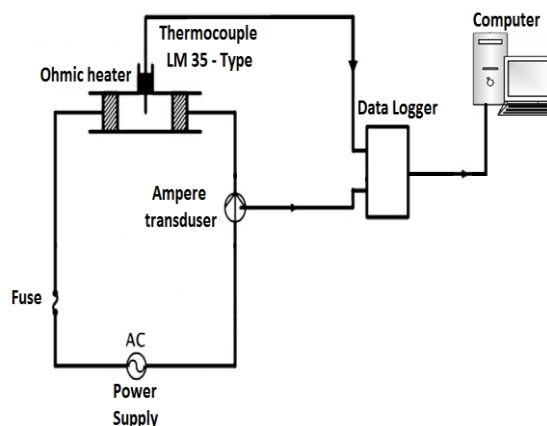


Fig 1 The complete experimental setup of batch ohmic heater for measuring of electrical conductivity of paddy water

که ΔH و ΔH^* به ترتیب تغییرات آنتالپی نشاسته در برنج در حال ژلاتینه شدن و تغییرات آنتالپی نشاسته در برنج غیر ژلاتینه شده و SG درصد ژلاتینه شدن نشاسته برنج (%) را نشان می‌دهد [۴۸].

۲-۵- مدل ریاضی خواص فیزیکی - الکتریکی

با مقدار ژلاتینه شدن نشاسته برنج

در ابتدا مقدار رطوبت شلتوک، ولتاژ خروجی حسگر خازنی و هدایت الکتریکی آب شلتوک به همراه درصد ژلاتینه شدن نشاسته برنج طی زمان و دماهای مختلف غوطه‌وری مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. هر یک از مقادیر رطوبت، هدایت الکتریکی و ولتاژ با برازش مدل خطی ریاضی که بتواند با کمترین خطای رگرسیون، درجه ژلاتینه شدن را پیش‌بینی کند، به‌عنوان مبنای اندازه‌گیری بی-درنگ درصد ژلاتینه شدن قرار خواهد گرفت.

۲-۶- روش تجزیه و تحلیل اطلاعات و بررسی

کارایی مدل‌ها

تمامی طرح‌ها در یک آزمایش فاکتوریل با ۳ تکرار در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. تجزیه واریانس یا تحلیل آماری با نرم افزار *SPSS* صورت گرفت. تدوین بهترین رابطه ریاضی بین خاصیت رطوبتی- الکتریکی با مقدار ژلاتینه شدن نشاسته برنج برحسب خطاهای رگرسیونی SSE^1 و $RMSE^1$ و ضریب تبیین R^{2*} توسط نرم‌افزار *Matlab2016* انجام شد. مقادیر R^2 ، $RMSE$ و SSE به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2} \quad (3)$$

$$RMSE = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (X_{pre,i} - X_{exp,i})^2}{N} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$SSE = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{pre,i} - X_{exp,i})^2}{N-z} \quad (5)$$

N ، Z ، $X_{pre,i}$ و $X_{exp,i}$ به ترتیب تعداد داده‌های آزمایشگاهی، تعداد متغیر در مدل، داده‌های مدل و نتایج آزمایشگاهی می‌باشد.

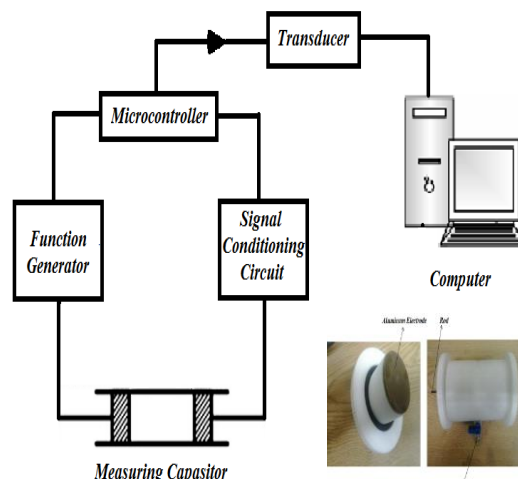


Fig 2 The complete experimental setup of capacitance sensor for measuring of voltage of paddy water

در سامانه مذکور با برقراری جریان از طریق مدار تغذیه، مولد موج فعال و یک جریان متناوب با موج سینوسی بر روی حسگر خازنی اعمال خواهد شد، مقدار این جریان پس از عبور از حسگر و یکسو شدن به میکروکنترلر ارسال می‌گردد. مقادیر محاسبه شده توسط میکروکنترلر از طریق مبدل به رایانه ارسال و برحسب میلی ولت ذخیره می‌شود. قابل ذکر است کلیه اندازه‌گیری در فرکانس 1 MHz انجام شد. زیرا در بسامد 1 MHz می‌توان با دقت بالایی مقدار دی‌الکتریک را به دست آورد [۱۹].

۲-۴- اندازه‌گیری درصد ژلاتینه شدن نشاسته

برنج

در تحقیق حاضر برای اندازه‌گیری درصد ژلاتینه شدن نشاسته برنج در دما و زمان‌های مختلف غوطه‌وری از دستگاه کالری‌متر تفاضلی استفاده شد [۴۲]. برای اندازه‌گیری درصد ژلاتینه شدن نشاسته برنج طی غوطه‌وری، ۳۰٪ شلتوک آسیاب شده با ۷۰٪ آب ترکیب شده و در دستگاه کالری متر تفاضلی از ۲۵ تا 130°C با آهنگ $2^\circ\text{C}/\text{min}$ قرار گرفت [۸]. خروجی دستگاه کالری‌متر تفاضلی یک منحنی از شار حرارت نسبت به دما بوده که سطح زیر نمودار تغییرات آنتالپی را به دست می‌دهد. درجه ژلاتینه شدن توسط کالری متر تفاضلی طبق رابطه (۲)، محاسبه می‌گردد:

$$SG(\%) = \left[1 - \frac{\Delta H}{\Delta H^*} \right] \times 100 \quad (2)$$

1. The sum of squares error (SSE)
2. Root mean square error (RMSE)
3. coefficient of determination (R2)

۳- نتایج و بحث

۳-۱- محتوای رطوبت شلتوک

اولین گام در فرآیند نیم‌جوش کردن، جذب رطوبت کافی توسط دانه و ژلاتینه‌شدن نشاسته آن طی غوطه‌وری می‌باشد که با غوطه‌وری شلتوک در آب، قابل دستیابی است [۴۹]. مطابق شکل (۳)، در دمای غوطه‌وری پایین، میزان جذب رطوبت طی غوطه‌وری خیلی کم بوده و نرخ جذب رطوبت، در دماهای بالاتر افزایش یافت [۵۰، ۵۱]. همچنین مقدار نرخ جذب رطوبت (از ۲۱/۱۸ تا ۳۵/۱ بر پایه‌ی تر) برحسب زمان به‌طور لگاریتمی (مطابق جدول (۲)) و معنی‌دار ($P < 0.05$) افزایش پیدا کرد. که این نرخ، در ساعت ابتدایی غوطه‌وری، بالا بوده سپس در ساعت انتهایی، به‌تدریج و آهستگی زیاد شد. روابط لگاریتمی در جدول (۲)، به همراه خطای رگرسیونی نشان داده‌شده است.

زمان بهینه برای غوطه‌وری وقتی است که میزان رطوبت نهایی شلتوک به مقدار ۳۵٪ بر پایه‌ی تر برسد [۴۹]. بنابراین تغییرات میزان رطوبت شلتوک تا مقدار ۳۵٪ بر پایه‌ی تر، برای سطوح مختلف دما و زمان غوطه‌وری به همراه انحراف معیار در شکل

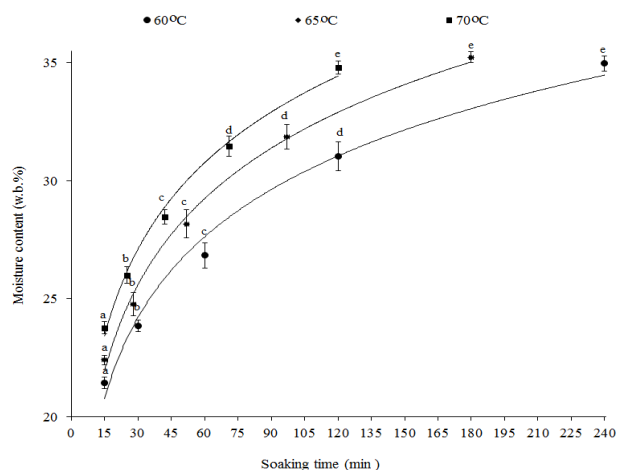


Fig 3 Hydration of paddy at various temperatures during soaking

**Different letters indicate a significant difference ($P < 0.05$). The error bars represent \pm one standard error of the mean.

Table 2 Different models and regression coefficients for the relationship between moisture content (MC (w.b.%), electrical conductivity (EC (mS/cm)), capacitance sensor voltage (mV) and DSG (%) and soaking time (t (min) of paddy at different temperatures of soaking

R^2	Equation	Soaking temperature ($^{\circ}C$)
0.9879	$MC = 4.9436 \ln(t) + 7.3791$	60
0.9946	$MC = 5.2741 \ln(t) + 7.6442$	65
0.9938	$MC = 5.2944 \ln(t) + 9.0833$	70
0.9304	$EC = 0.0822 \ln(t) + 0.5893$	60
0.9934	$EC = 0.2076 \ln(t) + 0.3375$	65
0.9845	$EC = 0.2941 \ln(t) + 0.167$	70
0.9527	$V = -0.0054t^2 + 2.3081t + 206.73$	60
0.9984	$V = -0.008t^2 + 2.9884t + 246.01$	65
0.9766	$V = -0.0067t^2 + 3.0208t + 326.94$	70
0.9665	$DSG = 8.8281 \ln(x) - 20.282$	60
0.9937	$DSG = 8.7895 \ln(x) - 16.785$	65
0.9994	$DSG = 9.1482 \ln(x) - 12.143$	70

** MC: Moisture content (%); EC: Electrical conductivity (mS/cm); V: capacitance sensor voltage (mV); DSG: Degree of starch gelatinization (%); t: Time (min).

بررسی‌ها نشان داد که مدل لگاریتمی بهترین مدل برازش شده برای مقدار هدایت الکتریکی برحسب زمان غوطه‌وری می‌باشد. زیرا این مدل دارای بالاترین مقدار R^2 ($R^2 > 0.93$) مطابق جدول (۲) است. این نتایج با مطالعات گزارش‌شده برای فرآوری آرد، نشاسته برنج و سبوس برنج سازگار می‌باشد [۳۶، ۵۲].

۳-۲- هدایت الکتریکی آب شلتوک

مطابق شکل (۴)، هدایت الکتریکی آب شلتوک در سطوح مختلف دما و زمان غوطه‌وری اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که مقدار هدایت الکتریکی آب شلتوک طی غوطه‌وری (از ۰/۸۳ تا ۰/۸۳ mS/cm) به‌طور معنی‌دار ($P < 0.05$) و لگاریتمی افزایش یافت.

تغییرات ولتاژ خروجی از حسگر خازنی طی غوطه‌وری شلتوک در شکل (۵) نشان داده شده است.

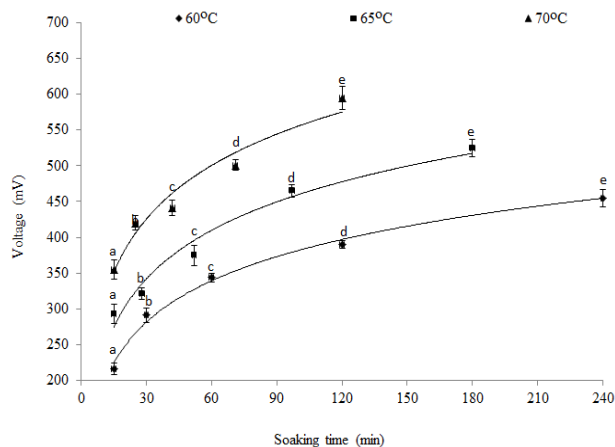


Fig 5 Output voltage of capacitance sensor for paddy water at different soaking temperatures during soaking

****Different letters indicate a significant difference ($P < 0.05$). The error bars represent \pm one standard error of the mean.**

مطابق شکل، با افزایش زمان و دمای غوطه‌وری مقدار ولتاژ به طور معنی‌داری ($P < 0.05$) (از ۲۱۶ تا ۵۹۵ mV) افزایش یافت. این افزایش می‌تواند به علت ژلاتینه شدن نشاسته شامل متورم شدن گرانول‌ها^۱ و ذوب بلوره‌های آمیلوپکتین^۲ طی غوطه‌وری باشد [۹، ۵۵، ۵۶]. بهترین معادله برازش داده شده بر داده‌ها با کمترین خطای رگرسیونی ($R^2 > 0.95$)، معادله درجه دوم به دست آمد. معادله‌ها به همراه خطای رگرسیونی در جدول (۲) نشان داده شده است. مطابق جدول، یک همبستگی بالایی بین ولتاژ اندازه‌گیری شده و زمان غوطه‌وری وجود دارد. این نتایج حاصل از واسنجی حسگر، نشان داد که سایر محققان نیز مدل درجه دوم را برای پیش‌بینی ولتاژ خروجی حسگر خازنی پیشنهاد داده‌اند [۴۷، ۵۷، ۵۸]. منحنی‌های نشان داده شده برای نمونه‌های حاصل از دماهای مختلف غوطه‌وری، متقاطع نیستند که این می‌تواند به دلیل تفاوت خواص فیزیکی نمونه‌ها باشد. لذا می‌توان ولتاژ خروجی، حسگر خازنی را در دما و زمان‌های مختلف غوطه‌وری با دقت بالا پیش‌بینی کرد.

۳-۴- درجه ژلاتینه شدن نشاسته برنج

[۵۳]. روابط مختلف بین هدایت الکتریکی و زمان غوطه‌وری در دماهای مختلف به همراه خطای رگرسیونی در جدول (۲)، نشان داده شده است. با افزایش دمای غوطه‌وری نیز مقدار هدایت الکتریکی افزایش یافت. زیرا با افزایش دمای غوطه‌وری و نزدیک شدن آن به دمای ژلاتینه‌شدن، گرانول‌های نشاسته متورم می‌گردند [۳۰]. همچنین، با افزایش پیوسته دما و زمان، مقداری از گرانول‌های نشاسته شروع به تجزیه کرده و نرخ حرکت ذرات باردار افزایش خواهد یافت؛ بنابراین مقدار هدایت الکتریکی با افزایش دمای غوطه‌وری افزایش می‌یابد [۳۶، ۵۲]. همچنین بررسی‌ها نشان داد که مقدار هدایت الکتریکی مواد غذایی با تغییر ساختار شیمیایی آن تغییر می‌کند [۵۴].

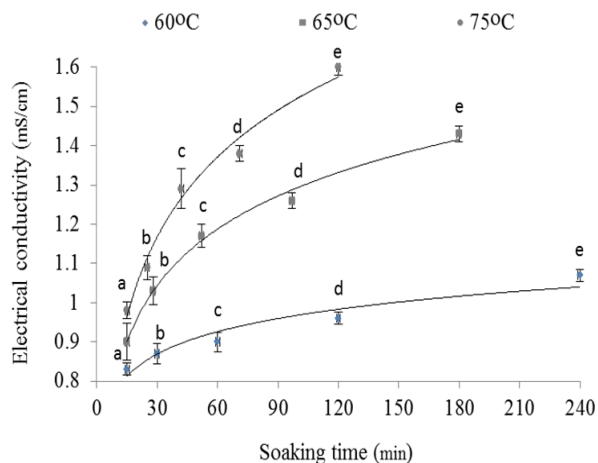


Fig 4 Electrical conductivity of paddy water at different soaking temperatures during soaking

****Different letters indicate a significant difference ($P < 0.05$). The error bars represent \pm one standard error of the mean.**

اختلاف در هدایت الکتریکی می‌تواند به دلیل مقاومت متفاوت ذرات باردار از یکدیگر در دماهای مختلف غوطه‌وری باشد. این نتایج خیلی با اهمیت است، زیرا گزارش‌های بسیار زیادی از مقدار هدایت الکتریکی نشاسته و ترکیب نشاسته-آب وجود دارد [۸، ۳۰، ۵۲، ۵۳]. آن‌ها گزارش داده‌اند که هدایت الکتریکی نشاسته و ترکیب نشاسته-آب طی حرارت اهمی با افزایش دما، افزایش می‌یابد. اما رفتار هدایت الکتریکی به عنوان تابعی از زمان غوطه‌وری برای شلتوک رقم شیرودی، تاکنون گزارش نشده است.

۳-۳- ولتاژ خروجی حسگر خازنی

1. Granule swelling
2. Amylopectin crystal melting

گرانول‌های نشاسته به‌طور برگشت‌ناپذیر متورم و به وزن مولکولی پایین‌تر تبدیل خواهد شد؛ که این فرآیند به ترکیب تیمار دما-زمان طی غوطه‌وری بستگی دارد [۶۳، ۶۴]. مقدار ژلاتینه شدن نشاسته برنج، شاخصی از شدت فرآیند نیم‌جوش کردن است [۶، ۶۵]. به‌عبارت‌دیگر طی فرآیند نیم‌جوش کردن، مقدار ژلاتینه‌شدن نشاسته برنج، زیاد شده که این افزایش، متناسب با شدت تیمار گرمایی است [۸، ۵۹].

۳-۵- مدل ریاضی خواص فیزیکی - الکتریکی

با مقدار ژلاتینه شدن نشاسته برنج

با استفاده از مدل خطی رگرسیونی، تغییرات درصد ژلاتینه‌شدن نشاسته برنج نسبت به مقدار رطوبت شلتوک و مقدار ولتاژ خروجی، حسگر خازنی و هدایت الکتریکی آب شلتوک به‌طور جداگانه با استفاده از برنامه *Matlab 2016* برازش گردید. مقادیر خطای رگرسیونی (*Adjusted R²*، *R²*، *RMSE*، *SSE*) مدل‌های خطی، برای دماهای مختلف غوطه‌وری در جدول (۳) نشان داده شد. مطابق جدول، درجه ژلاتینه شدن نشاسته برنج با مقادیر هدایت الکتریکی آب شلتوک با بیشترین مقدار *R²* و *Adjusted R²* کمترین مقادیر *RMSE* و *SSE*، بهترین برازش را در مقایسه با بقیه خواص اندازه‌گیری شده، نشان داد. لذا مقدار هدایت الکتریکی با دقت بیشتری توانست، درجه ژلاتینه شدن نشاسته برنج طی غوطه‌وری را پیش‌بینی کند. بنابراین اگر مقدار هدایت الکتریکی طی غوطه‌وری به حد معینی برسد آنگاه می‌توان گفت که مقدار ژلاتینه شدن نشاسته برنج، به حد مشخصی رسیده است. به‌عبارت‌دیگر، زمان اتمام فرآیند غوطه‌وری مدت زمانی است که نشاسته برنج تا مقدار معلومی ژلاتینه گردد (مثلاً برای دمای غوطه‌وری 70°C تا حدود ۳۳٪ ژلاتینه شود). درنهایت می‌توان نتیجه‌گیری کرد، با توسعه سامانه‌ای که قادر به اندازه‌گیری بی‌درنگ مقدار هدایت الکتریکی آب شلتوک طی زمان‌های مختلف غوطه‌وری باشد؛ آنگاه به‌راحتی می‌توان از طریق سامانه، دستور زمان اتمام فرآیند غوطه‌وری را صادر کرد.

مقدار ژلاتینه شدن نشاسته برنج، یکی از مهم‌ترین خواص گرمایی برنج است که توسط دستگاه مایکرو کالری‌متر تفاضلی با نرخ گرمایی $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ طی زمان و دماهای مختلف غوطه‌وری اندازه‌گیری شد و نتایج آن در شکل (۶) به همراه مقدار انحراف معیار نشان داده شده است. در تمامی تیمارهای غوطه‌وری، مقادیر ژلاتینه‌شدن نشاسته برنج (از ۵/۴۷ تا ۳۱/۷۴٪) به‌طور معنی‌داری ($P < 0.05$) طی غوطه‌وری افزایش یافت.

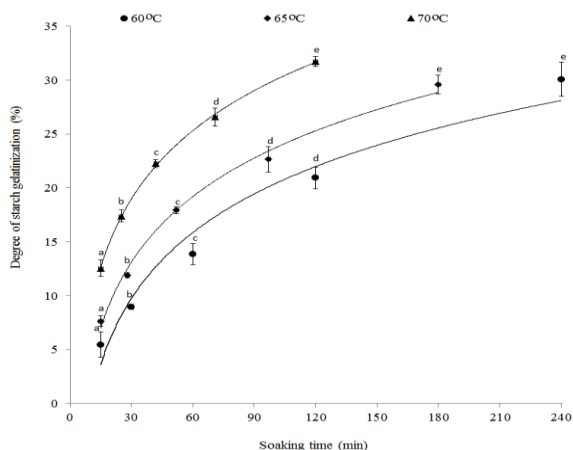


Fig 6 Effect of soaking time on gelatinization at different temperatures of soaking
**Different letters indicate a significant difference ($P < 0.05$). The error bars represent \pm one standard error of the mean.

با افزایش زمان غوطه‌وری، مقدار ژلاتینه شدن به‌طور معنی‌داری ($P < 0.05$) افزایش یافت. این نتایج با مطالعات محققان قبلی سازگار است [۵۹-۶۱]. آن‌ها بیان کرده‌اند که مقدار ژلاتینه‌شدن نشاسته برنج با شدت تیمار نیم‌جوش کردن افزایش می‌یابد. جدول (۲)، روابط بین زمان غوطه‌وری شلتوک و مقدار ژلاتینه شدن نشاسته برنج را نشان می‌دهد. معادله لگاریتمی با کمترین خطای رگرسیونی، بهترین برازش را پیش‌بینی مقادیر ژلاتینه‌شدن نشاسته برنج برحسب زمان غوطه‌وری داشته است. همچنین با افزایش دمای غوطه‌وری، مقدار ژلاتینه شدن نشاسته افزایش یافت. این یافته‌ها با نتایج ارائه شده توسط دیگر محققان سازگار است [۶، ۸، ۶۲]. غوطه‌وری برنج تحت تیمار گرمایی، موجب جذب آب توسط گرانول‌های نشاسته در برنج شده و در نتیجه

Table 3 The linear model for the relationship between DSG% and physical-electrical properties

SSE	RMSE	Adjusted	R ²	Equation	Soaking temperature
-----	------	----------	----------------	----------	---------------------

R^2				$(^{\circ}C)$
17.58	2.421	0.9395	0.9546	$DSG=1.833 \times MC-35.11$ 60
4.753	1.259	0.9836	0.9877	$DSG=104.7 \times EC-60.14$ 60
20.38	2.606	0.9299	0.9474	$DSG=0.1047 \times V-19.63$ 60
14.57	2.204	0.9352	0.9514	$DSG=1.486 \times MC-24.75$ 65
1.22	0.6376	0.9946	0.9959	$DSG=42.24 \times EC-30.96$ 65
902.9	17.35	0.9684	0.9763	$DSG=11.13 \times V+196$ 65
3.651	1.103	0.9526	0.9645	$DSG=0.6612 \times MC-14.81$ 70
0.001945	0.02546	0.9906	0.9929	$DSG=0.03473 \times EC+0.4886$ 70
1300	20.82	0.9473	0.9604	$DSG=11.8 \times V+201.6$ 70

** MC: Moisture content (%); EC: Electrical conductivity (mS/cm); V: capacitance sensorvoltage (mV); DSG: Degree of starch gelatinization (%).

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش مقدار خواص فیزیکی شلتوک (رطوبت)، خواص الکتریکی آب شلتوک (ولتاژ خروجی حسگر خازنی و هدایت الکتریکی) و درجه ژلاتینه شدن نشاسته برنج برای رقم شیرودی در زمان و دماهای مختلف غوطه‌وری مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. برای سنجش خواص الکتریکی آب شلتوک، سامانه‌ای طراحی و توسعه داده شد. نتایج نشان داد که مقدار رطوبت شلتوک (از ۲۱/۱۸ تا ۳۵/۱٪ بر پایه تر)، هدایت الکتریکی آب شلتوک (۰/۶۳ تا ۱/۶ mS/cm) و درصد ژلاتینه شدن نشاسته برنج (۵/۵ تا ۳۱/۷٪) طی غوطه‌وری، به‌طور معنی‌دار ($P<0.05$) و با معادله‌ی نمایی افزایش یافت. درحالی‌که تغییرات مقادیر ولتاژ خروجی حسگر خازنی برای آب شلتوک (از ۲۱۶ تا ۵۹۵ mV)، طی غوطه‌وری، روند افزایش معنی‌داری ($P<0.05$) با معادله درجه دوم داشت. برازش خواص فیزیکی شلتوک و الکتریکی آب شلتوک با درجه ژلاتینه شدن نشاسته برنج نشان داد که با مقادیر هدایت الکتریکی می‌توان، درجه ژلاتینه شدن نشاسته برنج را با کمترین خطا ($R^2>0.98$) پیش‌بینی کرد. بنابراین از نتایج این پژوهش می‌توان، برای پیش‌بینی درجه ژلاتینه شدن نشاسته برنج شیرودی طی دما و زمان‌های مختلف غوطه‌وری استفاده کرد. درنهایت، مؤلفین پیشنهاد می‌کنند که در تحقیقات آینده، می‌توان یک سامانه‌ای کاربردی و ارزان قیمت را برای اندازه‌گیری بی‌درنگ هدایت الکتریکی آب شلتوک طی غوطه‌وری برای پیش‌بینی درجه ژلاتینه شدن نشاسته برنج طراحی و توسعه داد. که این سامانه قادر به صدور فرمان برای اتمام فرآیند غوطه‌وری باشد.

۵- تشکر و قدردانی

از دانشگاه محقق اردبیلی، در تأمین بودجه برای اجرای طرح با عنوان "تعیین بی‌درنگ درجه ژلاتینه شدن نشاسته برنج نیم جوش با اندازه‌گیری ثابت دی‌الکتریک آب شلتوک طی غوطه‌وری" و شماره ۱۰۴۸ مورخ ۱۳۹۶/۵/۲۵ تشکر و قدردانی می‌شود.

۶- منابع

- [1] Bualuang, O., Tirawanichakul, S., and Tirawanichakul, Y. 2011. Study of drying kinetics and qualities of two parboiled rice: hot air and infrared radiation. TICHe International Conference, ee010: 1-6.
- [2] Juliano, B.O., Perez, C.M., Barber, S., Blakeney, A.B., Iwasaki, T.A., Shibuya, N., Keneaster, K.K., Chung, S., Laignelet, B., Launay, B., Del Mundo, A.M., Suzuki, H., Shiki, J.I., Tsuji, S., Yama, J.T., Tatsumi, K., and Webb, B.D. 1981. International cooperative comparison of instrument method for cooked rice texture. *Journal of Texture Studies*, 12: 17-38.
- [3] Derycke, V., Vandeputte, G.E., Vermeylen, R., De Man, W., Goderis, B., Koch, M.H.J., and Delcour, J.A. 2005. Starch gelatinization and amylose-lipid interactions during rice parboiling investigated by temperature resolved wide angle X-ray scattering and differential scanning calorimetry. *Journal of Cereal Science*, 42: 334-343.
- [4] Delcour, J.A. and Hosney, R.C. 2010. Rice and Oat Processing. St. Paul, MN, USA: AACC International, Inc.
- [5] Miah, M.A.K., Haque, A., Douglass, M.P., and Clarke, B. 2002a. Parboiling of rice. Part

- [17] Dunlap, W.C. and Makower, B. 1945. Radio frequency dielectric properties of dehydrated carrots. *Journal of Physical Chemistry A*, 49: 601-621.
- [18] Sacilik, K. and Colak, A. 2010. Determination of dielectric properties of corn seeds from 1 to 100 MHz. *Powder Technology*, 203: 365-370.
- [19] Soltani, M. and Alimardani, R. 2011. Moisture-Dependent Dielectric Properties of Pea and Black-Eyed Pea. *Journal of American Science*, 7: 60-64.
- [20] Zhu, X., Guo, W., Wu, X., and Wang, S. 2012. Dielectric properties of chestnut flour relevant to drying with radio-frequency and microwave energy. *Journal of Food Engineering*, 113: 143-150.
- [21] Tahmasebi, M., Tabatabaei kolor, R., and Hashemi, J. 2016. Effect of moisture content and frequency in dielectric properties of two paddy variety. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 47: 51-61.
- [22] Ragni, L., Gradari, P., Berardinelli, a., Giunchi, a., and Guarnieri, a. 2006. Predicting Quality Parameters of Shell Eggs using a Simple Technique based on the Dielectric Properties. *Biosystem Engineering* 94: 255-262.
- [23] Mechteldis, G.E., Zeist, W., and Cone, J.W. 1992. Prediction of degradability of starch by gelatinization enthalpy measured by differential scanning calorimetry. *Starch/Starke*, 44: 9-14.
- [24] Huang, J., Hess, W.M., Weber, D.J., Purcell, A.E., and Huber, C.S. 1990. Scanning electron microscopy: tissue characteristics and starch granule variations of potatoes after microwave and conductive heating. *Food Struct*, 9: 113-122.
- [25] Zobel, H.F., Young, S.N., and Rocca, L.A. 1988. Starch gelatinization: an X ray study. *Cereal Chemistry*, 65: 443-446.
- [26] Bircan, C. and Barringer, S.A. 1998. Salt-Starch Interactions as Evidenced by Viscosity and Dielectric Property Measurements. *Journal of Food Science*, 63: 983-986.
- [27] Piyasena, P., Ramaswamy, H.S., Awuah, G.B., and Defelice, C. 2003. Dielectric properties of starch solutions as influenced by temperature, concentration, frequency and salt. *Journal of Food Process Engineering*, 26: 93-119.
- I: Effect of hot soaking time on quality of milled rice. *International Journal of Food Science & Technology*, 37: 527-537.
- [6] Patindol, J., Newton, J., and Wang, Y.J. 2008. Functional properties as affected by laboratory-scale parboiling of rough rice and brown rice. *Journal of food Science*, 73: E370-7.
- [7] Marshall, W.E., Wadsworth, J.I., Verma, L.R., and Velupillai, L. 1993. Determination the degree of gelatinization in parboiled rice: comparison pf a subjective and an objective method. *Cereal chemistry*, 70: 226-230.
- [8] Miah, M.A.K., Haque, A., Douglass, M.P., and Clarke, B. 2002. Parboiling of rice. Part II: Effect of hot soaking time on the degree of starch gelatinization. *International Journal of Food Science & Technology*, 37: 539-545.
- [9] Motwani, T., Seetharaman, K., and Anantheswaran, R.C. 2007. Dielectric properties of starch slurries as influenced by starch concentration and gelatinization. *Carbohydrate Polymers*, 67: 73-79.
- [10] Taghinezhad, E., Khoshtaghaza, M.H., Suzuki, T., Minaei, S., and Brenner, T. 2016a. Quantifying the Relationship between Rice Starch Gelatinization and Moisture-Electrical Conductivity of Paddy during Soaking. *Journal of Food Process Engineering*, 39: 442-452.
- [11] Ragni, L., Al-Shami, A., Mikhaylenko, G., and Tang, A. 2007. Dielectric characterization of hen eggs during storage. *Journal of Food Engineering*, 82: 450-459.
- [12] Nelson, S.O. 2005. Dielectric spectroscopy in agriculture. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 351: 2940-2944.
- [13] Kumhala, F., Prosek, V., and J., B. 2009. Capacitive throughput sensor for sugar beets and potatoes. *Biosystems engineering*, 102: 36-43.
- [14] Nelson, S.O. 2008. Dielectric properties of agricultural products and some applications. *Research in Agricultural Engineering*, 54: 104-112.
- [15] Berbert, P.A., Queiroz, D.M., and Melo, E.C. 2002. Dielectric properties of common bean. *Biosystems Engineering*, 83: 449-462.
- [16] Soltani, M. and Omid, M. 2015. Detection of poultry egg freshness by dielectric spectroscopy and machine learning techniques. *LWT-Food Sci. Technol.* , 62: 1034-1042.

- gelatinized maize starch dispersions properties. Food Chemistry, 172: 353-360.*
- [39] Taghinezhad, E., Khoshtaghaza, M.H., Minaei, S., Suzuki, T., and Brenner, T. 2016. Relationship Between Degree of Starch Gelatinization and Quality Attributes of Parboiled Rice During Steaming. *Rice Science, 23: 339-344.*
- [40] Jittanit, W., Khuenpet, K., Kaewsri, P., Dumrongpongpaiboon, N., Hayamin, P., and Jantarangsri, K. 2017. Ohmic heating for cooking rice: Electrical conductivity measurements, textural quality determination and energy analysis. *Innovative Food Science & Emerging Technologies, 42: 16-24.*
- [41] Kanjanapongkul, K. 2017. Rice cooking using ohmic heating: Determination of electrical conductivity, water diffusion and cooking energy. *Journal of Food Engineering, 192: 1-10.*
- [42] Chungcharoen, A. and Lund, D.B. 1987. Influence of solutes and water on rice starch gelatinization. *Cereal chemistry, 64: 240-243.*
- [43] AACC. 1976. Approved methods of analysis. American Association of Cereal Chemists. St. Paul, Minnesota, USA.
- [44] Islam, M.R., Shimizu, N., and Kimura, T. 2004. Energy requirement in parboiling and its relationship to some important quality indicators. *Journal of Food Engineering, 63: 433-439.*
- [45] Sareepuang, K., Siriamornpun, S., Wiset, L., and Meeso, N. 2008. Effect of soaking temperature on physical, chemical and cooking properties of parboiled Fragrant rice. *World Journal of Agricultural Sciences, 4: 409-415.*
- [46] Icier, F., Yildiz, H., and Baysal, T. 2008. Polyphenoloxidase deactivation kinetics during ohmic heating of grape juice. *Journal of Food Engineering, 85: 410-417.*
- [47] Tahmasebi, M., Tabatabaei kolor, R., and Hashemi, J. (2012). The feasibility of a Capacitive Sensing Method for Measurement of Moisture content in paddy pazhohesh Variety. The 8 th. national congress on Agriculturl machinery engineering and mechanization. (ed.^eds. p.^pp. 1022-1028. ed., Mashhad University.
- [48] Swasdisevi, T., Sriariyakula, W., Tia, W., and Soponronnarit, S. 2010. Effect of pre-steaming on production of partially-parboiled
- [28] Zhu, Z. and Guo, W. 2017. Frequency, moisture content, and temperature dependent dielectric properties of potato starch related to drying with radio-frequency/microwave energy. *Scientific Reports, 7: 9311.*
- [29] Fan, D.-m., Lin, L.-f., Wang, L.-y., Huang, L.-l., Hu, B., Gu, X.-h., Zhao, J.-x., and Zhang, H. 2017. The influence of metal ions on the dielectric enhancement and radical generation of rice starch during microwave processing. *International Journal of Biological Macromolecules, 94: 266-270.*
- [30] Li, F.-D., Li, L.-T., Li, Z., and Tatsumi, E. 2004. Determination of starch gelatinization temperature by ohmic heating. *Journal of Food Engineering, 62: 113-120.*
- [31] Zareifard, M.R., Ramaswamy, H.S., Trigui, M., and Marcotte, M. 2003. Ohmic heating behaviour and electrical conductivity of two-phase food systems. *Innovative Food Science & Emerging Technologies, 4: 45-55.*
- [32] Icier, F. and Ilicali, C. 2005. Temperature dependent electrical conductivities of fruit purees during ohmic heating. *Food Research International, 38: 1135-1142.*
- [33] Sarang, S., Sastry, S.K., and Knipe, L. 2008. Electrical conductivity of fruits and meats during ohmic heating. *Journal of Food Engineering, 87: 351-356.*
- [34] Assiry, A.M., Gaily, M.H., Alsamee, M., and Sarifudin, A. 2010. Electrical conductivity of seawater during ohmic heating. *Desalination, 260: 9-17.*
- [35] MoralesSanchez, E., Figueroa, J.D., and Gaytan-Martínez, M. 2009. Wet method for measuring starch gelatinization temperature using electrical conductivity. *Journal of food Science, 74: E382-85.*
- [36] Dhingra, D., Chopra, S., and Rai, D.R. 2012. Stabilization of raw rice bran using ohmic heating. *Agricultural Research, 1: 392-398.*
- [37] Qiu, S., Li, Y., Chen, H., Liu, Y., and Yin, L. 2014. Effects of high-pressure homogenization on thermal and electrical properties of wheat starch. *Journal of Food Engineering, 128: 53-59.*
- [38] Lobato-Calleros, C., Hernandez-Jaimes, C., Chavez-Esquivel, G., Meraz, M., Sosa, E., Lara, V.H., Alvarez-Ramirez, J., and Vernon-Carter, E.J. 2015. Effect of lime concentration on

- [57] Lawrence, K.C., Funk, D.B., and Windham, W.R. 2001. Dielectric moisture sensor for cereal grains and soybeans. *Transaction of ASAE*, 44: 1691-1696.
- [58] Taghinezhad, J., Alimardani, R., and Jafari, A. 2012. Development of a Capacitive Sensing Device for Prediction of Water Content in Sugarcane Stalks. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 44: 61-68.
- [59] Islam, M.R., Roy, P., Shimizu, N., and Kimura, T. 2002. Effect of processing conditions on physical properties of parboiled rice. *Food Science and Technology Research*, 8: 106-112.
- [60] Lamberts, L., Brijs, K.M.R., Verhelst, N., and Delcour, J.A. 2006. Impact of browning reactions and bran pigments on color of parboiled rice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54: 9924-9929.
- [61] Manful, J.T., Grimm, C.C., Gayin, J., and Coker, R.D. 2008. Effect of variable parboiling on crystallinity of rice samples. *Cereal Chemistry*, 85: 92-95.
- [62] Himmelsbach, D.S., Manful, J.T., and Coker, R.D. 2008. Changes in rice with variable temperature parboiling: Thermal and spectroscopic assessment. *Cereal Chemistry*, 85: 384 - 390.
- [63] Mahanta, C.L. and Bhattacharya, K.R. 1989. Thermal degradation of starch in parboiled rice. *Starch - Stärke*, 41: 91-94.
- [64] Takahashi, T., Miura, M., Ohisa, N., and Kobayashi, S. 2005. Modification of gelatinization properties of rice flour by heat-treatment. *Journal of the Society of Rheology*, 33: 81-85.
- [65] Oli, P., Ward, R., Adhikari, B., and Torley, P. 2014. Parboiled rice: Understanding from a materials science approach. *Journal of Food Engineering*, 124: 173-183.
- rice using hot-air fluidization technique. *Journal of Food Engineering*, 96: 455-462.
- [49] Das, I., Das, S.K., and Bal, S. 2004. Specific energy and quality aspects of infrared (IR) dried parboiled rice. *Journal of Food Engineering*, 62: 9-14.
- [50] Nawab, A. and Pandya, A.C. 1974. Basic concept of parboiling of paddy. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 19: 111-115.
- [51] Bhattacharya, K.R. 1985. Parboiling of rice. In *rice chemistry and technology*, Juliano, B.O. (Ed.). American Association of Cereal Chemists, Inc., Minnesota, pp: 289-348.
- [52] Chaiwanichsiri, S., Ohnishi, S., Suzuki, T., Takai, R., and Miyawaki, O. 2001. Measurement of electrical conductivity, differential scanning calorimetry and viscosity of starch and flour suspensions during gelatinisation process. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 81: 1586-1591.
- [53] Morales-Sanchez, E., Martinez, M.G., Vega, M.L.R., and Cardenas, J.D.C.F. 2007. Electrical conductivity and kinetic parameters of rice starch. *Journal of Food Process Engineering*, 30: 578-583.
- [54] An, H.J. and King, J.M. 2007. Thermal characteristics of ohmically heated rice starch and rice flours. *Journal of food Science*, 72: C084-88.
- [55] Tananuwong, K. and Reid, D.S. 2004. DSC and NMR relaxation studies of starch-water interactions during gelatinization. *Carbohydrate Polymers*, 58: 345-358.
- [56] Waigh, T.A., Gidley, M.J., Komanshek, B.U., and Donald, A.M. 2000. The phase transformations in starch during gelatinisation: a liquid crystalline approach. *Carbohydrate Research*, 328: 165-176.

Online Fitting of Starch Gelatinization Degree of Parboiled Rice Based on Physical-Electrical Properties of Paddy During Soaking (Case Study: Shiroudi Variety)

Taghinezhad, E.^{1*}, Rasooli Sharabiani, V.²

1. Moghan College of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2. Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Iran.

(Received: 2018/01/10 Accepted:2018/05/28)

The soaking stage is the most important steps of the paddy parboiling process that requires precise control, because starch granules are gelatinized during soaking. The measurement of degree of starch gelatinization (DSG) of rice has high costs using differential scanning calorimeter (DSC) and this method cannot be utilized to obtain online data. Thus, in present study a mathematical relationship was quantified between the DSG of rice and the paddy physical (paddy moisture) -electrical (electrical conductivity (EC) and capacitance sensor output voltage of paddy water) during soaking portion of the parboiling process. For measuring of electrical properties of paddy water was designed and manufactured an experimental system of ohmic heater and capacitance sensor for measuring electrical conductivity and voltage, respectively. For doing experiment, paddy (Shiroudi variety) was parboiled by soaking at the temperature of 60, 65 and 70 °C. At each temperature, paddy samples and paddy water were selected at five different soaking times. The experimnet results showed that paddy moisture content (21.18-35.1%w.b.), electrical conductivity (0.63-1.6 mS.cm⁻¹) and output voltage of capacitance sensor (216 – 595 mV) of paddy water and rice DSG (5.5 to 31.7%) increased significantly (P<0.05) and exponentially (R²>0.98), exponentially (R²>0.93),quadraticly (R²>0.95) and exponentially (R²>0.96)during soaking, respectively.A linear relationships were fittedbetween DSG of parboiled rice and physical-electrical properties of paddy water.The results revealed that EC of paddy water be able to predict the DSG of rice during soaking with the lowest regression error.

Keywords: Parboiled rice, Capacitance sensor, Shiroudi variety, Degree of starch gelatinization, Electrical conductivity

* Corresponding Author E-Mail Address: e.taghinezhad@uma.ac.ir