

Research Article

Prediction and optimization of rheological parameters of potato starch modified by cold plasma

Azadeh Ranjbar Nedamani^{1*}, Ali Taghavi², Ali Motevali³, Seyyed Jafar Hashemi⁴

1. Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Iran,
2. MSC Student of Post-Harvest Technologies, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Iran.
3. Associate Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Iran.
4. Associate Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Iran.

(Received: 18 January 2025, Revised: 9 February 2025, Accepted: 11 February 2024)

Introduction: Starch is a crucial ingredient in the production of various food products, with its functional properties varying depending on the source. However, the use of natural starch in industrial applications has been met with several challenges. These include the low temperature at which starch paste forms, limited tolerance of natural starch to various processing methods, and the low hardness of the gels it forms. These factors ultimately constrain the widespread use of natural starch, particularly in the food industry. To overcome these limitations, starch modification is commonly performed after its extraction using various methods, including chemical, physical, enzymatic, and thermal processes. These modifications alter the functional properties of starch, enhancing its applicability in the food industry, depending on the specific conditions applied. Plasma-active species, in particular, interact with starch through three main mechanisms: crosslinking, depolymerization, and removal of granule surfaces, which further modify its properties.

Materials and methods: Potato starch powder was sourced from Zamen Food Products Manufacturing Company, located in Mashhad Industrial City, Iran. The starch was stored in plastic packaging, ensuring it remained sealed and free from exposure to external air. For the cold plasma treatment, a homemade cold plasma generator was used. This device consists of two main sections: the cold plasma generation unit and a sample storage compartment. It is capable of producing cold plasma and facilitating direct contact between the sample and ionized air. A plasma reactor equipped with copper and steel electrodes was used to generate a voltage of 20 kV and a current of 3 mA at 50 Hz, with atmospheric air facilitating the collision of the plasma with the sample. To prepare the starch samples, a randomized complete

*Corresponding author: a.ranjbar@sanru.ac.ir

factorial experimental design was applied, with factors including pre-gelatinization temperature (60, 55, and 0°C), cold plasma treatment time (30, 15, and 0 minutes), and starch drying temperature (80, 70, and 60°C). Following this, a 2% (w/w) suspension of potato starch was heated at 100°C for 1 hour. The suspension was vortexed every 5 minutes, and after 1 hour, the samples were allowed to cool to room temperature (25°C). The shear flow behavior of the 2% starch dispersion at 25°C was measured using a viscometer (made in Spain) with a No. 3 spindle. Shear stress was applied incrementally over a range of 0 to 200 inverse seconds, and strain data were recorded. The fluid flow behavior of the starch dispersion was then analyzed using various rheological models. The flow data were fitted to the Power Law, Herschel-Bulkley, and Casson models using the nonlinear regression tool in SPSS 20 software.

Results and discussion: The Herschel-Bulkley model provided the best fit for the data in most cases, although the Power Law and Casson models also yielded good fits in certain treatments. This suggests that the type of treatment can result in a range of behaviors, from Newtonian to non-Newtonian thinning in the starch fluid. In general, as the pre-gelatinization temperature increased, the final viscosity of the starch samples decreased. However, for samples that were not pre-gelatinized, the coefficient k increased with plasma treatment time, rising from zero to 15 minutes. In samples that were not pre-gelatinized, the coefficient n increased with the other factors. However, in samples pretreated at 55°C, n decreased as the other factors increased. At a pre-gelatinization temperature of 60°C, the value of n remained constant but was generally lower than that of the other pre-gelatinization treatments. The drying temperature generally decreased the viscosity of the samples. Nevertheless, at each drying temperature, the effects of pre-gelatinization temperature and cold plasma treatment time on viscosity changes were significant. Both k and n coefficients decreased with increasing drying temperature. Additionally, increasing plasma treatment time led to a decrease in viscosity and k , although significant fluctuations in the value of n were observed. For instance, in samples that did not undergo plasma treatment, pre-gelatinization and drying at the lowest temperature resulted in a Newtonian to shear-thickening behavior ($n=1.1$) in the fluid. However, increasing the drying temperature at the same pre-gelatinization temperature caused n to decrease to around 0.83. In contrast, for samples that received 15 minutes of plasma treatment, the key factors influencing changes in n were the drying and pre-gelatinization temperatures. Finally, in samples subjected to the longest cold plasma treatment time of 30 minutes, increasing both drying and pre-gelatinization temperatures led to a decrease in n , shifting the fluid behavior from Newtonian to shear-thinning.

Conclusions: The study of the effect of cold plasma treatment on the rheological properties of potato starch reveals a significant influence of temperature and treatment time on both the viscosity behavior and molecular structure of the starch. The results highlight that cold plasma treatment, particularly at temperatures below 60°C, has a marked effect on reducing rheological parameters such as starch

viscosity and consistency. These changes in rheological properties result from the chemical and physical effects of cold plasma active species on starch granules, including alterations to the granule surface, the formation of pores, and increased water absorption. Additionally, it was found that starch modification through cold plasma treatment enhances its functional properties, particularly its hydrophilicity and solubility. Additionally, the effect of temperature during both pre-gelatinization and drying processes is clearly evident, highlighting the importance of controlling these conditions to achieve an optimal structure in the treated starches. The findings from this study not only enhance our understanding of the rheological behavior of starch but also offer insights for optimizing industrial processes related to the production and application of this modified starch.

Keywords: Potato starch, Starch modification, Cold plasma, Rheology, Starch dispersion

How to cite this article:

Ranjbar Nedamani, A., Taghavi, A., Motevali, A., & Hashemi, S. J., (2024). Prediction and optimization of rheological parameters of potato starch modified by cold plasma , *Innov. Food Technol.*,11(4),373-393. <https://doi.org/10.22104/IFT.2025.7349.2194>

مقاله پژوهشی

پیش‌بینی و بهینه‌سازی پارامترهای رئولوژیکی نشاسته سیب‌زمینی اصلاح‌شده با پلاسمای سرد

آزاده رنجبر ندامانی^{۱*}، علی تقوی^۲، علی متولی^۳، سیدجعفر هاشمی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

۲. استادیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

۳. دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

(تاریخ ارسال: ۱۴۰۳/۱۰/۲۹، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۲۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۳)

چکیده:

در این تحقیق نشاسته سیب‌زمینی توسط پلاسمای سرد تیمار و سپس در دماهای مختلف خشک شد. پلاسمای سرد با استفاده از یک راکتور پلاسما شامل الکترودهای مسی و فولادی، ولتاژ ۲۰ kV، با جریان ۳ mA دارای ۵۰ HZ، با کمک هوای اتمسفر تولید و با نمونه برخورد کرد، سپس رفتار جریان دیسپرسیون^۱ درصد نشاسته با مدل‌های رئولوژیکی قانون توان، هرشل-بالکلی و کسون با کمک جعبه ابزار نرم رگرسیون نرم‌افزار SPSS 20 برازش شدند. براساس نتایج به‌دست‌آمده مدل هر شگل-بالکلی توانسته است در بیشتر موارد برازش دقیق‌تری با داده‌ها داشته باشد. با افزایش دمای پیش‌ژلاتینه‌شدن، ویسکوزیته نهایی نمونه‌های نشاسته کاهش یافته است. ضریب n در نمونه‌هایی که پیش‌ژلاتینه نشده بودند، با افزایش سایر فاکتورها افزایش یافت، اما در نمونه‌هایی که در دمای 55°C پیش‌تیمار شده بودند، با افزایش سایر فاکتورها کاهش نشان داد. دمای خشک‌کردن به‌طور کلی باعث کاهش ویسکوزیته نمونه‌ها شد. در هر دما، اثر دمای پیش‌ژلاتینه و زمان تیمار با پلاسمای سرد بر تغییرات ویسکوزیته معنادار بود. ضرایبی مانند k و n نیز با افزایش دمای خشک‌کردن، کاهش یافتند. افزایش زمان تیمار با پلاسمای باعث کاهش ویسکوزیته و k در نمونه‌ها شد، اما نوسانات قابل توجهی در مقدار n از خود نشان داد. در نمونه‌هایی که بیشترین زمان تیمار با پلاسمای سرد یعنی ۳۰ دقیقه را دریافت کرده بودند، افزایش دمای خشک‌کردن و دمای پری‌ژلاتینه‌کردن باعث کاهش n و تغییر رفتار سیال از حدود نیوتنی، به رقیق‌شونده با برش شد. نتایج این پژوهش نشانگر اثر تیمار پلاسمای سرد بر رفتار رئولوژیکی نشاسته سیب‌زمینی است و راهکارهایی برای بهینه‌سازی فرایندهای صنعتی مرتبط با تولید و کاربرد این نوع نشاسته را نیز فراهم کرده است.

واژه‌های کلیدی: نشاسته سیب‌زمینی، اصلاح نشاسته، پلاسمای سرد، رئولوژی، دیسپرسیون نشاسته.

*نویسنده مسئول: a.ranjbar@sanru.ac.ir

¹ Dispersion

۱. مقدمه:

نشاسته ماده مهمی در تولید مواد غذایی مختلف است که با توجه به منبع، ویژگی‌های عملکردی متعددی را داراست. استفاده از نشاسته طبیعی در صنعت، همواره با چالش‌هایی روبه‌رو بوده است. برای مثال، دمای پایین تشکیل خمیر نشاسته، تحمل اندک نشاسته طبیعی به فرایندهای مختلف، سختی کم ژل تشکیل‌شده از آن و غیره، که در نهایت باعث محدودیت استفاده از نشاسته طبیعی در صنعت به‌ویژه صنایع غذایی شده است [۱-۲]. به همین دلیل اصلاح نشاسته از فرایندهایی است که بعد از استخراج، با کمک روش‌های شیمیایی، فیزیکی، آنزیمی و حرارتی انجام می‌شود. این امر باعث تغییر ویژگی‌های عملکردی نشاسته و بسته به شرایط اصلاح، گستردگی کاربرد آن در صنعت غذا می‌شود [۳-۵].

تقاضای روبه‌رشد برای مصرف مواد غذایی صنعتی که با روش‌های ایمن فراوری و تولید می‌شوند، باعث شده است که کاربرد مواد شیمیایی برای اصلاح ویژگی‌های عملکردی نشاسته با محدودیت‌هایی مواجه شود. به همین دلیل، اغلب محققین به دنبال بررسی روش‌های فیزیکی و ایمن برای این امر بوده‌اند. در بین این روش‌ها می‌توان به تیمارهای هیدروترمال، پرتودهی، پلاسما سرد، امواج فراصوت، و غیره اشاره کرد [۶-۷].

عبارت پلاسما اولین بار توسط اروینگ لانگمیر در سال ۱۹۲۸، برای تعریف حالت چهارم ماده استفاده شد. در این حالت ماده که اغلب گاز برانگیخته‌شده با نیروی الکتریکی ولتاژ بالا و جریان کم است، گونه‌های مختلف فعال موسوم به گونه‌های پلاسما در گاز ایجاد می‌شوند. این گونه‌ها ممکن است با دمای بالا (پلاسما گرم) و یا دمای محیط (پلاسما سرد) تولید شوند، اما مشخص شده است که دمای تمامی گونه‌ها یکسان نیست؛ به‌ویژه در پلاسما سرد که دارای ذرات با دمای پایین، موسوم به مولکول‌های خنثی، گونه‌های اتمی مختلف و تاحدودی الکترون‌های با دمای بالا است [۸]. مشخص شده است که پلاسما سرد از کمترین اثرات جانبی سلامتی و زیست‌محیطی برخوردار است؛ چراکه یونیزاسیون گاز در این فرایند، مهم‌ترین عاملی است در کنار برانگیختگی یونی، تجزیه یونی، شکسته‌شدن مولکول و بازبرانگیختگی می‌تواند در نقض مهم

پلاسما سرد بر بسیاری از مطالعات انجام‌شده در حوزه مواد غذایی اثرگذار باشد [۹-۱۳]. گونه‌های فعال پلاسما، با نشاسته برهمکنش داده و از طریق سه مکانیسم احتمالی، مانند اتصال عرضی، دپلیمریزه‌کردن و کندن سطح گرانول، باعث اصلاح نشاسته می‌شود [۱۴، ۸]. علاوه‌براین، گروه‌های عملکردی جدیدی که ایجاد می‌شوند (مانند گروه‌های آب‌دوست قطبی که روی سطح بیوپلیمر تشکیل می‌شوند و بین گروه‌های فعال شیمیایی حاصل از برانگیختگی پلاسمایی، برهمکنش ایجاد می‌کنند)، می‌توانند در نشاسته تغییراتی ایجاد کنند [۱۵]. دپلیمریزه‌شدن و تکه‌شدن آمیلوز و آمیلوپکتین که یکی از نتایج تیمار نشاسته با پلاسما سرد است [۱۶-۱۷]، به‌شدت بر ویسکوزیته نشاسته اثرگذار است. ویسکوزیته یکی از فاکتورهای مهمی است که به‌عنوان ویژگی رئولوژیکی نشاسته اندازه‌گیری می‌شود، چراکه نشاسته به‌عنوان یک عامل غلیظ‌کننده، در بسیاری از محصولات غذایی کاربرد دارد [۱۸].

لی و همکاران (۲۰۰۲) به بررسی ویسکوزیته نشاسته سیب‌زمینی تیمار شده با اتیلن فعال‌شده با پلاسما سرد پرداختند و گزارش دادند به‌دلیل دپلیمریزه‌شدن، ۳۳٪ کاهش ویسکوزیته بعد از تیمار رخ داده است و بیشترین کاهش، زمانی رخ داد که نمونه‌ها با پلاسما اکسیژن تیمار شده بودند [۱۸]. سابلارز و همکاران (۱۹۹۲) گزارشی مشابه این نتیجه ارائه دادند [۱۹]. از طرفی میشل و همکاران (۱۹۸۰) بیان کردند که ویسکوزیته با تعداد گروه‌های احیاکننده و درجه دپلیمریزه‌شدن نشاسته رابطه عکس دارد [۲۰]. آبی و جین (۲۰۲۴) بیان کردند که افزایش اتصالات عرضی باعث کاهش ویسکوزیته نشاسته می‌شود، زیرا این اتصالات در تورم نشاسته نقض بازدارندگی از خود نشان می‌دهند [۲۱].

همانند سایر روش‌های فیزیکی اصلاح نشاسته، پلاسما سرد می‌تواند بر ویسکوزیته آن اثر بگذارد. به‌همین دلیل، بررسی رفتار جریان سیال بعد از تیمار با پلاسما سرد اهمیت بالایی داشته و هدف از این تحقیق تعیین اثر پلاسما سرد، نقش پیش‌ژلاتینه‌کردن و تیمار پلاسما سرد و در نهایت دمای خشک‌کردن نشاسته بر ویژگی‌های رئولوژیکی نشاسته سیب‌زمینی است.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. پودر نشاسته

پودر نشاسته سیب‌زمینی از شرکت تولیدی محصولات غذایی ضامن واقع در ایران، شهرک صنعتی مشهد در بسته‌بندی پلاستیکی تهیه شده است، بدون آنکه با هوای بیرون در تماس باشد.

۲.۲. تیمار با پلاسمای سرد

برای تیمار نشاسته با پلاسمای سرد، از دستگاه مولد پلاسمای سرد دست‌ساز استفاده شد. این دستگاه شامل دو بخش اصلی

یعنی بخش مولد پلاسمای سرد و بخش نگهداری نمونه است که از توانایی تولید پلاسمای سرد و ایجاد تماس مستقیم نمونه با هوای یونیزه‌شده برخوردار است. با استفاده از یک راکتور پلاسما، شامل الکترودهای مسی و فولادی، ولتاژ ۲۰ kV و جریان ۳ mA در فرکانس ۵۰ Hz، پلاسمای سرد تولید و با نمونه برخورد کرد.

در تهیه نمونه‌های نشاسته، طرح آزمایش‌های فاکتوریل کامل به صورت تصادفی با فاکتورهای دمای پیش‌ژلاتینه (۳۰ min، ۶۰ °C، ۵۵ و ۰)، زمان تیمار با پلاسمای سرد (۶۰ و ۱۵ و ۰)، و دمای خشک‌کردن نشاسته (۸۰ °C، ۷۰ و ۶۰) طبق جدول (۱) اجرا شد.

جدول ۱. طرح آماری فاکتوریل کاملاً تصادفی برای انجام تیمارهای نشاسته سیب‌زمینی

Table 1. completely randomized factorial statistical design for potato starch treatments

Run Number	Pre-gelatinization Temperature (°C)	Drying Temperature (°C)	Cold-Plasma time (min)
R1	0	60	0
R21	0	60	15
R24	0	60	30
R25	0	70	0
R7	0	70	15
R12	0	70	30
R10	0	80	0
R13	0	80	15
R27	0	80	30
R11	55	60	0
R18	55	60	15
R9	55	60	30
R3	55	70	0
R5	55	70	15
R26	55	70	30
R23	55	80	0
R2	55	80	15
R22	55	80	30
R4	60	60	0
R8	60	60	15
R16	60	60	30
R14	60	70	0
R19	60	70	15
R17	60	70	30
R20	60	80	0
R6	60	80	15
R15	60	80	30

۲ و کسون^۳ (معادله ۳) با کمک جعبه‌ابزار نرم رگرسیون نرم‌افزار SPSS 20 برازش شدند.

$$\tau = k_p \dot{\gamma}^{n_p} \quad (1)$$

که در آن τ مقدار تنش برشی (Pa)، k شاخص قوام (Pa.s^n)، n اندیس رفتار جریان سیال (بدون بعد) و γ نرخ برشی (s^{-1}) است.

$$\tau = \tau_{0H} + k_H \dot{\gamma}^{n_H} \quad (2)$$

که در آن τ_0 تنش تسلیم است.

$$\tau^{0.5} = \tau_0^{0.5} + k \dot{\gamma}^{0.5} \quad (3)$$

۷.۲. عکس‌برداری SEM

میکروگراف‌های نشاسته با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی (مدل) در بزرگ‌نمایی ۲۰۰ و ولتاژ ۲۰ kV به‌دست آمد.

۸.۲. آنالیز آماری و پیش‌بینی مدل

تیمارها توسط نرم‌افزار دیزاین اکسپرت نسخه ۱۲ طراحی شدند. مدل‌سازی و بهینه‌سازی شرایط تیمار توسط این نرم‌افزار در سطح معناداری ۰/۰۵ انجام شد. نمودارها توسط اکسل رسم و آزمون‌ها در دو تکرار انجام شدند. بهترین مدل بر اساس بالاترین ضریب تبیین (R^2) و کمترین جذر میانگین مربعات خطاها (RMSE) توسط مدل‌سازی با جعبه برازش خط نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۰ انجام شد. تفاوت‌های معنی‌داری پارامترهای رئولوژیکی بر اساس آنالیز کای-اسکوئر در سطح ۵٪ معناداری بررسی شد. برای پیش‌بینی پارامترهای رئولوژیکی از جعبه پیش‌بینی نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۰ استفاده شد.

۳.۲. آماده‌سازی نمونه‌ها

با کمک تراوژی دیجیتال (بادقت ۰/۰۰۱ گرم)، مقدار ۱۰ گرم نشاسته در ۹۰ گرم آب‌مقطر ریخته و یک محلول ۱۰٪ (w/w) تهیه شد. نمونه‌هایی که باید تیمار پری‌ژل دریافت می‌کردند، تا دمای مورد نظر پری‌ژل به مدت ۴۰ دقیقه گرمادهی شده و بعد از تغییر رنگ و ویسکوزیته، برای انجام تیمار پلاسما سرد در دستگاه قرار داده شدند. در نهایت تمام نمونه‌ها در دمای موردنظر جدول ۱، در آون هوای گرم اف جی فن‌دار مدل BM55E تا رسیدن به وزن ثابت خشک شدند. نمونه‌های خشک‌شده توسط آسیاب پودر شده و جهت انجام آزمون رئولوژیکی، در دمای محیط در بسته‌بندی‌های پلاستیکی نفوذناپذیر به هوا و نور، نگهداری شدند.

۴.۲. تهیه دیسپرسیون نشاسته

یک سوسپانسیون ۲٪ (w/w) از نشاسته سیب‌زمینی در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت نگهداشته شد. هر ۵ دقیقه عملیات ورتکس انجام و بعد از یک ساعت نمونه‌ها در دمای اتاق (25°C) خنک شدند.

۵.۲. آزمون رئولوژیکی

رفتار جریان برشی ناشی از تنش برشی در دیسپرسیون نشاسته ۲٪ در دمای 25°C با استفاده از دستگاه ویسکومتر مدل V2 ساخت کشور اسپانیا کمپانی Visco Tech با کمک اسپیندل شماره ۳ تعیین شد. دامنه تنش اعمال شده به دیسپرسیون از ۰ الی ۲۰۰ معکوس ثانیه به صورت افزایشی بوده و داده‌های کرنش ثبت شدند. سپس با کمک مدل‌های رئولوژیکی رفتار جریان سیال مورد تحلیل قرار گرفت [۲۲].

۶.۲. مدل‌سازی رئولوژیکی

رفتار جریان دیسپرسیون ۱،۵ درصد نشاسته با مدل‌های رئولوژیکی قانون توان^۱ (معادله ۱)، هرشل-بالکلی^۲ (معادله

^۱ Power law

^۲ Herschel-Bulkley

^۳ Casson

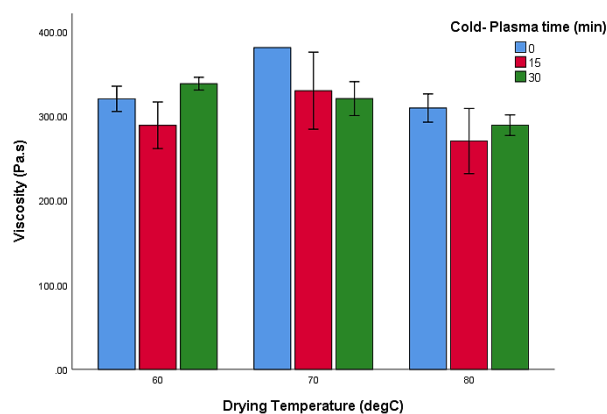
۳. نتایج و بحث

در تحلیل علمی داده‌های رئولوژیکی، ارتباط بین تیمارها و نتایج رئولوژیکی بررسی می‌شوند. این تحلیل شامل بررسی اثر دماهای مختلف پیش‌ژلاتینه‌شدن و خشک کردن نشاسته و همچنین زمان‌های مختلف تیمار با پلاسما سرد بر روی رفتار رئولوژیکی نمونه‌ها است.

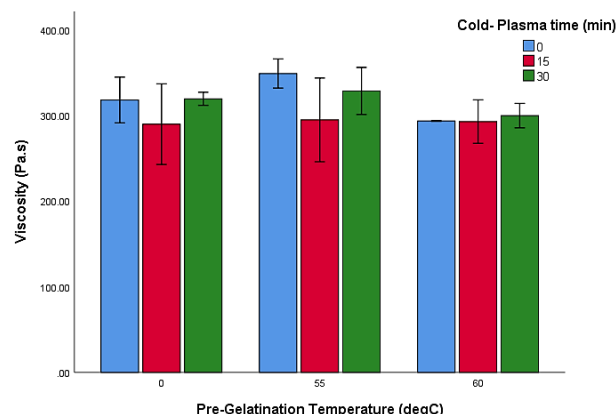
۱.۳. ویسکوزیته دیسپرسیون نشاسته

خمیر نشاسته به‌عنوان یک سیال غیرنیوتنی، شبه‌پلاستیک و تیکسوتروپ شناخته می‌شود و مقادیر قوام و شاخص رفتار جریان آن تابع عوامل مختلفی است. در شکل ۱ اثر زمان تیماردهی با پلاسما سرد، دمای پیش‌ژلاتینه‌کردن و دمای خشک کردن نشاسته به‌صورت اثر متقابل بر ویسکوزیته دیسپرسیون نشاسته نشان داده می‌شود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در دمای پیش‌ژلاتینه 60°C اثر تیمار با پلاسما بر ویسکوزیته معنادار نبوده و نمونه‌های تیمار شده، ویسکوزیته مشابهی با نمونه شاهد داشتند (شکل ۱- b). اما در دمای پیش‌ژلاتینه‌شدن 55°C و همچنین در نمونه‌های

که تیمار پیش‌ژلاتینه دریافت نکرده بودند، نوساناتی در ویسکوزیته نمونه‌ها دیده شد. هرچند این نوسانات در مجموع معنادار نبودند. از طرفی با مقایسه کلی اثر تیمار پلاسما و دمای پیش‌ژلاتینه می‌توان استنتاج کرد تیمار با پلاسما سرد در ۱۵ دقیقه، در هیچ حالتی باعث تغییر معنادار ویسکوزیته نشده بود. همچنین با بررسی اثر دمای خشک کردن نشاسته (شکل ۱- a) مشاهده می‌شود در دو دمای 80°C و 70°C ، افزایش زمان تیمار با پلاسما سرد باعث کاهش ویسکوزیته شد. مدل برازش شده برای تعیین ویسکوزیته نیز برای هر تیمار همبستگی بالایی را نشان داد که نتایج آن در جدول ۲ نشان داده می‌شود. ضریب تبیین بالا نشان‌دهنده همبستگی مناسب بین داده‌ها بوده و دقت محاسبه ویسکوزیته هر نمونه بالا است. نتایج بررسی فاکتورهای مؤثر بر ویسکوزیته نشان داد هرچند تیمارهای مختلفی بر روی نمونه نشاسته سیب‌زمینی انجام شده است، اما دمای خشک کردن نشاسته اثر معنادار ($p < 0.05$) بر ویسکوزیته داشت و در این مورد سایر فاکتورها معنادار نبودند.



(a)



(b)

شکل ۱. اثر متقابل زمان پلاسما سرد و دمای پیش‌ژلاتینه‌کردن (b) بر ویسکوزیته نشاسته سیب‌زمینی Fig1. Interaction of cold plasma time and drying temperature (a) and cold plasma time and pregelatinization temperature (b) on the viscosity of potato starch

سیال هرشل- بالکلی و سیال کسون را به همراه مقادیر ضریب تبیین هر معادله خط برازش شده نشان می‌دهد.

جدول ۱ مقادیر قوام سیال (k) و شاخص رفتار جریان سیال (n) حاصل از برازش داده‌های مربوط به معادلات قانون توان،

در مورد برازش داده‌ها با قانون توان مشاهده می‌شود در اکثر تیمارها، ضریب تبیین حدود ۰/۹ به دست آمده است که نشان‌دهنده رفتار نیوتنی سیال است، اما در برخی تیمارها مقدار n کمتر از یک است که رفتار سود و پلاستیک سیال معنا می‌شود. مدل کسون بیشتر مرتبط با سیالاتی است که رفتار پلاستیک از خود نشان می‌دهند. در جدول یک مشخص شده است که این مدل در مورد برخی تیمارها بهترین برازش را داشته است. برای مثال تیمار R_3 که کمترین دمای پیش‌ژلاتینه‌شدن را داشته و بدون تیمار با پلاسمای تولید شده، بهترین برازش را از خود نشان داده است.

بر اساس داده‌های جدول ۱، به نظر می‌رسد انتخاب مدل مناسب، به نوع تیمار بستگی دارد، اما مدل هرشکل-بالکلی توانسته است در بیشتر موارد برازش دقیق‌تری با داده‌ها داشته باشد هرچند در برخی تیمارها قانون توان و مدل کسون هم به‌خوبی برازش شده‌اند. این بدان معناست که نوع تیمار می‌تواند باعث ایجاد انواع رفتار از نیوتنی تا غیرنیوتنی رقیق‌شونده در سیال نشاسته باشد.

ضریب تبیین دامنه‌ای بین ۰/۶۳ تا ۰/۹۹ داشته است. هرچه ضریب تبیین به ۱ نزدیک‌تر باشد، مدل به‌خوبی با داده‌ها تناسب دارد. همچنین ویسکوزیته سیال مقداری بین $213/15 \text{ Pa.s}$ تا $380/6$ هست که علت آن ماهیت نمونه ناشی از نوع تیمار است. مقدار k در مدل توان عددی بین $2/17 \text{ Pa.s}^n$ تا $3/96$ ، در مدل هرشل-بالکلی بین $27/4$ تا $3/2$ و در مدل کسون بین $16/24 \text{ Pa.s}^n$ الی $27/4$ است. مقادیر بالای k نشان‌دهنده نیاز به تنش‌های برشی بیشتر برای ایجاد جریان در سیال است و می‌تواند شاخصی از رفتار غیرنیوتنی نیز باشد. مقدار n نشان‌دهنده رفتار جریان سیال است. مقادیر نزدیک به یک به معنای رفتار نیوتنی سیال و مقادیر کمتر از یک به معنای رفتار غیرنیوتنی (شبه‌پلاستیک) سیال است. برای مثال در مدل توان، R_{13} با مقدار $n=0/25$ بیشترین حالت غیرنیوتنی را از خود نشان داده است در حالی بیشتر تیمارهای دیگر دارای n نزدیک به یک هستند.

جدول ۱. پارامترهای مدل‌های قانون توان، هرشل-بالکلی و کسون برای نمونه‌های نشاسته در زمان‌های مختلف تیمار با پلاسمای سرد، دمای پری‌ژلاتینه و خشک کردن

Table 1. Power law, Herschel- Bulkley, and Casson model parameters for starch samples at different times of cold plasma treatment, pregelatinization temperature and drying temperature

Run Number	μ	R^2	Power law			Herschel-Bulkley			Casson		
			$k (\text{Pa.s}^n)$	N	R^2	$k (\text{Pa.s}^n)$	n	R^2	$k (\text{Pa.s}^n)$	n	R^2
R1	344.4	0.93	2.17	0.64	0.99	3.2	0.7	0.99	23.4	1.78	0.98
R21	280.27	0.97	2.98	0.54	0.97	3.03	0.61	0.97	20.52	1.42	0.99
R24	334.28	0.92	3.56	1.1	0.99	3.85	1.29	0.98	25.6	2.6	0.99
R7	375.2	0.96	3.64	1.03	0.95	3.8	1.19	0.94	26.7	2.63	0.98
R12	310.1	0.95	3.42	0.91	0.96	3.56	1.1	0.95	23.65	2.19	0.98
R10	291.11	0.99	3.58	1.07	0.92	3.8	1.32	0.91	23.57	2.37	0.98
R13	213.15	0.74	2.57	0.25	0.9	2.56	0.28	0.9	16.24	0.64	0.82
R27	313.08	0.98	3.7	1.13	0.92	3.92	1.4	0.91	24.9	2.53	0.98
R11	322.8	0.86	3.64	1.1	0.99	3.82	1.3	0.99	25.13	2.57	0.96
R18	245.75	0.63	2.9	0.54	0.83	2.95	0.6	0.84	19.13	1.32	0.74
R9	352.43	0.95	3.7	1.1	0.97	3.9	1.3	0.96	26.35	2.69	0.99

R3	380.6	0.86	3.66	1.05	0.95	3.82	1.21	0.95	27.4	2.7	0.94
R26	358.9	0.96	3.4	0.84	0.96	3.5	0.95	0.96	25.1	2.23	0.99
R23	342.45	0.96	3.4	0.83	0.98	3.48	0.94	0.97	24.71	2.2	0.99
R2	343.4	0.99	3.07	0.537	0.9	3.1	0.592	0.9	22.7	1.56	0.96
R22	273.56	0.96	3.16	0.72	0.93	3.25	0.83	0.93	21.28	1.74	0.97
R4	292.8	0.77	3.05	0.617	0.651	3.07	0.64	0.95	21.15	1.52	0.86
R8	340.12	0.97	3.96	1.36	0.94	4.34	1.7	0.93	27	2.97	0.99
R16	327.07	0.91	3.06	0.55	0.98	3.1	0.6	0.98	22.21	1.55	0.97
R19	284.06	0.96	3.12	0.67	0.93	3.2	0.76	0.93	21.4	1.68	0.97
R17	291.71	0.7	3.16	0.7	0.92	3.22	0.79	0.93	21.84	1.78	0.82
R20	293.72	0.7	3.3	0.79	0.93	3.3	0.89	0.93	22.37	1.95	0.82
R6	253.6	0.721	3.26	0.86	0.94	3.4	1	0.96	21.13	1.93	0.85
R15	279.71	0.85	3.1	0.65	0.98	3.16	0.74	0.98	21.14	1.65	0.93

۲.۳. اثر دمای پیش‌ژلاتینه‌شدن

فاکتورهای دیگر ثابت ماند. ضریب n در نمونه‌هایی که پیش‌ژلاتینه نشده بودند، با افزایش سایر فاکتورها افزایش یافت، اما در نمونه‌هایی که در دمای 55°C پیش تیمار شده بودند، با افزایش سایر فاکتورها کاهش نشان داد. در دمای پیش ژلاتینه 60°C ، n ثابت بود، اما به‌طور کلی، از n سایر تیمارهای پیش‌ژلاتینه مقدار کمتری داشت.

طبق تحلیل آماری جدول ۲ و نتایج جدول ۱، می‌توان مشاهده کرد که با افزایش دمای پیش‌ژلاتینه‌شدن، ویسکوزیته نهایی نمونه‌های نشاسته کاهش یافته است، اما مقدار ضریب k با در نمونه‌هایی که پیش‌ژلاتینه نشده بودند، با افزایش زمان تیمار با پلاسما از صفر به ۱۵ دقیقه، افزایش یافت. در سایر نمونه‌های پیش‌ژلاتینه‌شدن، k با تغییر

جدول ۲. معناداری اثر سه فاکتور بر میزان ویسکوزیته، ضریب K و ضریب n نمونه‌های نشاسته

Table 2. Significance of the effect of three factors on the viscosity, k coefficient and n coefficient of starch samples

	Pre-Gelatination Temperature (degC) - n .Power	Drying Temperature (degC) - n .Power	Cold- Plasma time (min) - n .Power	Pre-Gelatination Temperature (degC) - k .Power	Drying Temperature (degC) - k .Power
Exact Sig. (2-tailed)	.152 ^b	.000 ^b	.064 ^b	.152 ^b	.000 ^b
	Cold- Plasma time (min) - k .Power	Pre-Gelatination Temperature (degC) - n .Casson	Drying Temperature (degC) - n .Casson	Cold- Plasma time (min) - n .Casson	Pre-Gelatination Temperature (degC) - k .Casson
Exact Sig. (2-tailed)	.064 ^b	.152 ^b	.000 ^b	.064 ^b	.152 ^b
	Drying Temperature (degC) - k .Casson	Cold- Plasma time (min) - k .Casson	Pre-Gelatination Temperature (degC) - n .H.B	Drying Temperature (degC) - n .H.B	Cold- Plasma time (min) - n .H.B
Exact Sig. (2-tailed)	.000 ^b	.307 ^b	.152 ^b	.000 ^b	.064 ^b



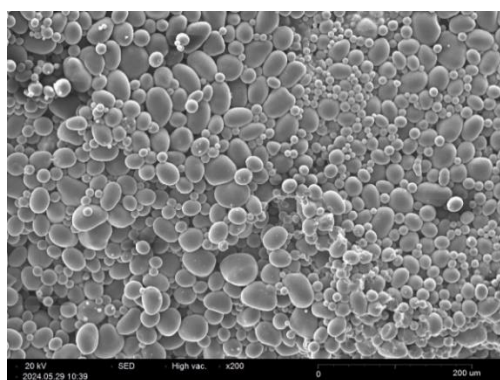
	Pre-Gelatination Temperature (degC) - k.H.B	Drying Temperature (degC) - k.H.B	Cold- Plasma time (min) - k.H.B	Pre-Gelatination Temperature (degC) - mu	Drying Temperature (degC) – mu
Exact Sig. (2-tailed)	.152 ^b	.000 ^b	.064 ^b	.000 ^b	.000 ^b
			Cold- Plasma time (min) – mu		
Exact Sig. (2-tailed)			.000 ^b		

۳.۳. اثر دمای خشک‌کردن

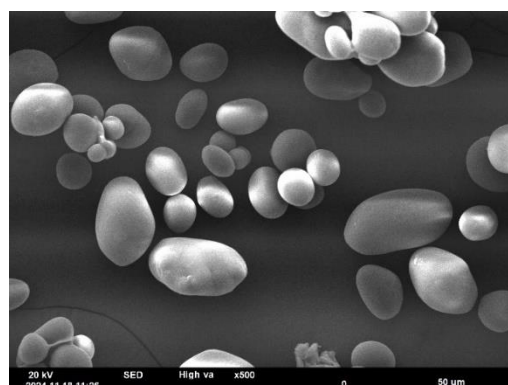
دمای خشک‌کردن باعث کاهش ویسکوزیته نمونه‌ها شده است، اما در هر دما، اثر دمای پیش‌ژلاتینه و زمان تیمار با پلاسمای سرد بر تغییرات ویسکوزیته معنادار است. ضرایبی مانند k و n نیز با افزایش دمای خشک‌کردن، کاهش یافته‌اند.

۴.۳. اثر تیمار با پلاسمای سرد

شکل ۲ تصاویر گرانول‌های نشاسته شاهد و تیمار شده با پلاسمای سرد را نشان می‌دهد. گرانول تیمار نشده سطح صاف‌تری دارند در حالی که تیمار با پلازما باعث تغییر در اندازه و تغییراتی در سطح صاف گرانول شد، زیرا مشخص گردید که پلازما واکنش‌های شیمیایی متوالی، مانند بازآرایی مولکولی، هیدراته‌شدن و هیدروژن‌شدن مولکول‌ها را آغاز می‌کند [۲۳-۲۴].



(a)



(b)

شکل ۲. ساختار گرانولی نشاسته تیمار شده (a) و شاهد (b)
Fig 2. Granular structure of treated starch (a) and control (b)

افزایش زمان تیمار با پلاسمای باعث کاهش ویسکوزیته و k در نمونه‌ها شد، اما نوسانات قابل توجهی در مقدار n از خود نشان داد. برای مثال در نمونه‌هایی که تیمار پلاسما دریافت نکرده بودند، پیش‌ژلاتینه و خشک کردن در کمترین دما، باعث ایجاد رفتار نیوتنی تا غلیظ‌شونده با برش ($n=1/1$) در سیال شد، اما افزایش دمای خشک کردن در همین دمای پیش‌ژلاتینه، باعث کاهش n تا حدود $0/83$ شد. در مقابل، در نمونه‌هایی که تیمار ۱۵ دقیقه پلاسما را دریافت کرده بودند، فاکتور مهم تأثیرگذار بر تغییرات n دمای خشک کردن و پری‌ژلاتینه بود. در نهایت، در نمونه‌هایی که بیشترین زمان تیمار با پلاسمای سرد یعنی ۳۰ دقیقه را دریافت کرده بودند، افزایش دمای خشک کردن و دمای پری‌ژلاتینه کردن باعث کاهش n و تغییر رفتار سیال از حدود نیوتنی، به رقیق‌شونده با برش شد. بیه و همکاران (۲۰۱۶) از معادله قانون توان برای برازش داده‌های ویسکوزیته نشاسته ذرت تیمار شده به پلاسمای DBD استفاده کردند. این نشان می‌دهد نشاسته‌ای که با این روش اصلاح شده بود، دارای ویژگی‌های جریانی مانند سیالات نیوتنی بود. به این ترتیب، می‌توان با اصلاح نشاسته با کمک تیمار پلاسمای سرد در شرایط مختلف، باعث تغییرات ویسکوزیته شده و کاربردهای نشاسته در مواد غذایی مختلف را گسترده‌تر کرد. نشاسته در حالت عادی یک ماده دارای تغییرات ویسکوزیته با دمای است ولی به طور کلی می‌توان آن را جزء سیالات رقیق‌شونده با برش در نظر گرفت. همچنین بیه و همکاران (۲۰۱۶) مشاهده کردند با افزایش زمان تیمار با پلاسما، ضریب قوام سیال (k) کاهش و اندیس رفتار جریان (n) افزایش یافت [۲۵]. ژانگ و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی اثر تیمار پلاسمای گاز نیتروژن بر ویژگی‌های خمیر نشاسته سیب‌زمینی پرداختند. آن‌ها گزارش دادند که پارامترهای تشکیل خمیر از جمله ویسکوزیته پیک، قوام، ویسکوزیته در نقطه شکست و ویسکوزیته نهایی بعد از تیمار کاهش یافت [۲۶]. همچنین آن‌ها مشاهده کردند که پلاسمای سرد هلیوم باعث کاهش بیشتر ویسکوزیته بعد از ۶۰ دقیقه تیمار شد. لی و همکاران (۲۰۱۱) در این مورد بیان کردند که نشاسته‌هایی که ویسکوزیته نقطه شکست آن‌ها کمتر بوده است، پایداری حرارتی بالاتر و تمایل بیشتری برای رتروگرید شدن داشتند [۲۷]. وانگسگنسپ و همکاران (۲۰۱۴) نیز ویژگی‌های ویسکوالاستیک دینامیک (مدول ذخیره، مدول الاستیک؛ و فاکتور اتلاف) نشاسته تاپیوکای تیمار شده با پلاسمای آرگون را

بررسی کرده و دریافتند نمونه‌هایی که در ۵۰ وات تیمار شده بودند، ساختار ژل مستحکم‌تری در مقایسه با نشاسته طبیعی تاپیوکا داشتند. از طرف دیگر، تیمار در ۱۰۰ وات به دلیل دپلمریزه کردن نشاسته، باعث کاهش این استحکام شد [۲۸]. جوشاک و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی ویژگی‌های رئولوژیکی دیسپرسیون ۵٪ نشاسته که در دماهای 90°C ، 80°C و 65°C به مدت ۵، ۱۵، ۳۰ و ۶۰ دقیقه گرما دیده بودند، پرداختند. آن‌ها دریافتند تمامی نمونه‌های مورد مطالعه رفتار رقیق‌شونده با برش داشتند و از خود تنش تسلیم نشان دادند. با افزایش دما، تنش تسلیم و ضریب سازگاری کاهش یافت در حالی که شاخص رفتار جریان و ویسکوزیته پلاستیک کسین افزایش یافته بود. همچنین مشخص شد نمونه‌ها تا دمای 80°C رفتار تیسکوتروپی و در دمای 95°C رفتار آنتی تیسکوتروپی از خود نشان دادند. در این مطالعه به‌وضوح مشخص شد که دما و زمان حرارت‌دهی تأثیر زیادی بر ویژگی‌های رئولوژیکی نشاسته سیب‌زمینی دارد [۲۹].

لواندوویچ و همکاران (۲۰۲۲) ویژگی‌های رئولوژیکی انواع نشاسته‌های اصلاح‌شده را بررسی نمودند. نشاسته‌های اصلاح‌شده مانند نشاسته اکسیدشده، نشاسته استیله، فسفات دی نشاسته و فسفات دی نشاسته استیله با هدف تعیین چگونگی اثر اصلاح شیمیایی بر ساختار مولکولی نشاسته سیب‌زمینی و در نتیجه ویژگی‌های رئولوژیکی و قابلیت تشکیل بافت بررسی شدند. در این تحقیق مشخص شد که اصلاح شیمیایی نشاسته منجر به تغییرات قابل توجهی در ویژگی‌های مولکولی و عملکردی محصولات نشاسته‌ای شد. همچنین نتایج نشان داد به دلیل ایجاد اتصالات عرضی، نشاسته قابلیت تغلیظ‌کنندگی بهتری پیدا کرده و علت آن را نوع عامل ایجاد این اتصالات عرضی دانستند [۳۰]. همچنین مشخص شده است که نشاسته‌های که با روش شیمیایی اکسیداسیون اصلاح می‌شوند، دارای بافت سفت‌تر و با چسبندگی کمتر هستند، اما نشاسته‌های استیله معمولاً بافتی نرم‌تر و چسبنده‌تر دارند [۳۱]. ژیانودین و همکاران (۲۰۱۷) گزارش دادند اصلاح نشاسته به‌ویژه با روش‌های شیمیایی منجر به تغییرات قابل توجه در خواص مولکولی و کاهش وزن مولکول می‌شود [۳۲]. به‌همین دلیل، می‌توان استنباط کرد این تغییرات ناشی از ویسکوزیته که در اثر فاکتورهای تیمار با پلاسمای سرد، دمای

مدل‌سازی به پژوهشگران این امکان را می‌دهد تا بدون انجام آزمایشات زیاد، تخمین دقیقی از پاسخ‌های احتمالی مورد آزمون داشته باشند؛ لذا پیش‌بینی شرایط بهینه پارامترهای رئولوژیکی نشاسته سیب‌زمینی که تحت شرایط مورد مطالعه تیمار شده‌اند، می‌تواند امکان تخمین رفتار رئولوژیکی بعد از هر تیمار را ایجاد کند. این موضوع از آن جهت اهمیت دارد که در این مطالعه مشاهده شد اثر شرایط تیمار، باعث بروز رفتار نیوتنی، غلیظ‌شونده با برش و رقیق‌شونده با برش در نشاسته‌ها شد و این می‌تواند دامنه استفاده از آن را در انواع محصولات غذایی و دارویی بیشتر کند. برای این منظور، ابتدا مدل‌سازی توسط نرم‌افزار دیزاین اکسپرت برای تمامی پاسخ‌ها انجام شد و نتایج آن به همراه پارامترهای معادله خط هر مدل برای هر پاسخ در جدول ۳ نشان داده شد. سپس پیش‌بینی پارامترهای مدل انجام و نتایج در شکل ۳ و تحلیل آماری آن در جدول ۴ نشان داده شد. این نتایج بیانگر آن است که علاوه بر تنوع شرایط تیمار، امکان پیش‌بینی پارامترهای مدل‌های قانون توان، هرشل-بالکلی و کسون وجود داشته است. همچنین همبستگی مناسب و معناداری بین داده‌های پیش‌بینی شده و آزمایشگاهی دیده می‌شود. این پیش‌بینی کاربرد شرایط دیگر هر فاکتور در تیمار نشاسته سیب‌زمینی را برای پژوهشگران و صنایعی که از نشاسته اصلاح‌شده استفاده خواهند کرد، آسان خواهد کرد.

ژلاتینه و خشک کردن در نشاسته ایجاد شده است، می‌تواند ناشی از تغییرات در ساختار مولکول نشاسته باشد. همچنین حرارت‌دهی طی پیش ژلاتینه کردن و همچنین خشک کردن نشاسته، حرارت باعث ژلاتینه شدن نشاسته، نفوذ آب به داخل گرانول‌های نشاسته و آغاز تورم غیرقابل برگشت و ذوب شدن میکروکریستال‌ها می‌شود [۳۳]. بعد از تیمار پلاسما، سطح گرانول‌ها حفره دار و تکه تکه دیده می‌شود که به دلیل دخالت رادیکال‌های آزاد و انواع گونه‌های فعال تولیدشده توسط پلاسما سرد است [۱۴]. با افزایش زمان این تغییرات در سطح بیشتر بود [۳۴]. همچنین تغییر شکل ظاهری گرانول‌ها و کلوخه شدن در آنها دیده شد. این کلوخه شدن به دلیل افزایش بار الکتریکی سطحی گرانول‌های نشاسته و افزایش جذب گرانول‌ها به یکدیگر است. گرانول‌هایی که کوچک بودند، تمایل به کلوخه شدن بیشتری داشتند. تشکیل حفرات در سطح نیز باعث افزایش جذب رطوبت، افزایش نشست آمیلوز و افزایش حلالیت نشاسته می‌شود، درحالی‌که کلوخه‌ای شدن گرانول‌ها باعث حفظ یک‌دستی گرانول‌های نشاسته می‌شود [۳۵].

۵.۳. مدل‌سازی و پیش‌بینی پارامترهای رئولوژیکی

یکی از مسائل مهم در مدل‌سازی‌های رئولوژیکی، امکان پیش‌بینی مدل‌ها و تخمین پارامترهای مورد نظر تحت شرایط مختلف است

جدول ۳. آنالیز مدل پاسخ‌های n ، k و ویسکوزیته معادلات رئولوژیکی توان، کسون و هرشل-بالکلی توسط دیزاین اکسپرت

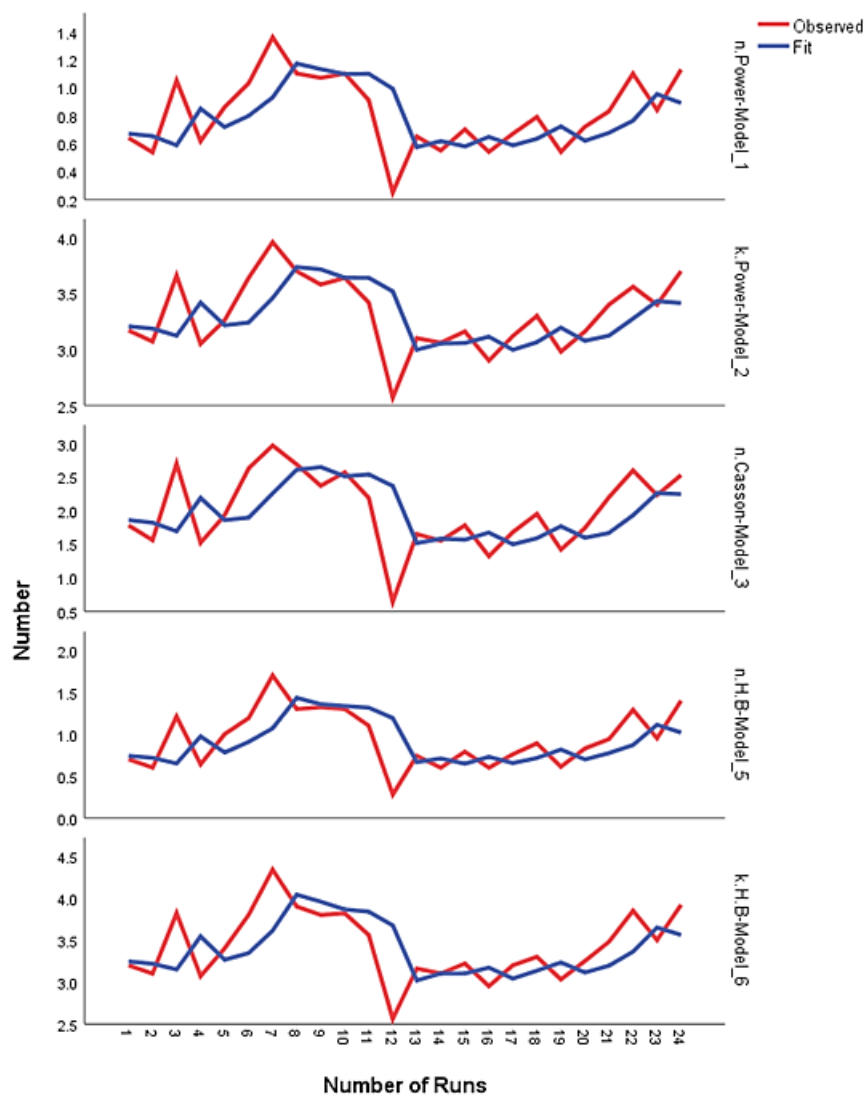
Table 3. Model Analysis for n , k , and viscosity of power law, casson, and herschel-bulkley equations with design expert

n-Power							
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	R ²	Adjusted R ²
Model	0.6690	3	0.2230	5.13	0.0286	0.6581	0.5299
A-PregelTemp	0.0122	1	0.0122	0.2802	0.6109		
B-Drying Temp	0.3063	1	0.3063	7.05	0.0290		
C-CPtime	0.0001	1	0.0001	0.0015	0.9703		
Residual	0.3476	8	0.0434				
Lack of Fit	0.1856	4	0.0464	1.15	0.4492		
Pure Error	0.1620	4	0.0405				
Cor Total	1.02	11					
Linear	Coefficient						
Intercept	0.7745						
A-PregelTemp	0.0798						
B-Drying Temp	-0.3302						
C-CPtime	-0.0048						

n-Casson							
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	R ²	Adjusted R ²
Model	3.17	3	1.06	5.36	0.0257	0.6676	0.5430
A-PregelTemp	0.0050	1	0.0050	0.0256	0.8769		
B-Drying Temp	1.75	1	1.75	8.86	0.0177		
C-CPtime	0.0066	1	0.0066	0.0337	0.8589		
Residual	1.58	8	0.1972				
Lack of Fit	0.9998	4	0.2500	1.73	0.3043		
Pure Error	0.5780	4	0.1445				
Cor Total	4.75	11					
Linear							
Intercept	1.85						
A-PregelTemp	0.0514						
B-Drying Temp	-0.7886						
C-CPtime	0.0486						
n-Herschel- Bulkley							
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	R ²	Adjusted R ²
Model	1.23	6	0.2052	1.78	0.02711	0.6815	0.2993
A-PregelTemp	0.0101	1	0.0101	0.0882	0.7784		
B-Drying Temp	0.5773	1	0.5773	5.02	0.0352		
C-CPtime	0.0587	1	0.0587	0.5098	0.5072		
AB	0.0654	1	0.0654	0.5686	0.4848		
AC	0.0126	1	0.0126	0.1097	0.7539		
BC	0.1193	1	0.1193	1.04	0.3552		
Residual	0.5753	5	0.1151				
Lack of Fit	0.2053	1	0.2053	2.22	0.2104		
Pure Error	0.3699	4	0.0925				
Cor Total	1.81	11					
Quadratic							
Intercept	0.7760						
A-PregelTemp	-0.0915						
B-Drying Temp	-0.6165						
C-CPtime	0.1965						
AB	-0.2140						
AC	0.0940						
BC	0.2890						
k-Power							
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	R ²	Adjusted R ²
Model	1.08	3	0.3604	5.38	0.0254	0.6686	0.5443
A-PregelTemp	0.0066	1	0.0066	0.0989	0.7612		
B-Drying Temp	0.5548	1	0.5548	8.28	0.0206		
C-CPtime	0.0005	1	0.0005	0.0069	0.9360		
Residual	0.5360	8	0.0670				
Lack of Fit	0.3113	4	0.0778	1.39	0.3800		
Pure Error	0.2247	4	0.0562				
Cor Total	1.62	11					
Linear							
Intercept	3.24						
A-PregelTemp	0.0589						
B-Drying Temp	-0.4445						
C-CPtime	0.0128						



k-Casson							
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	R ²	Adjusted R ²
Model	68.66	3	22.89	6.12	0.0364	0.6965	0.5827
A-PregelTemp	0.0529	1	0.0529	0.0142	0.7124		
B-Drying Temp	41.66	1	41.66	11.14	0.0307		
C-CPtime	0.1503	1	0.1503	0.0402	0.9556		
Residual	29.92	8	3.74				
Lack of Fit	24.51	4	6.13	4.53	0.4069		
Pure Error	5.41	4	1.35				
Cor Total	98.57	11					
Linear							
Intercept	22.27						
A-PregelTemp	-0.1664						
B-Drying Temp	-3.85						
C-CPtime	0.2314						
k-Herschel- Bulkley							
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	R ²	Adjusted R ²
Model	1.70	3	0.5668	4.65	0.0364	0.6358	0.4992
A-PregelTemp	0.0178	1	0.0178	0.1459	0.7124		
B-Drying Temp	0.8351	1	0.8351	6.86	0.0307		
C-CPtime	0.0004	1	0.0004	0.0033	0.9556		
Residual	0.9742	8	0.1218				
Lack of Fit	0.5479	4	0.1370	1.29	0.4069		
Pure Error	0.4263	4	0.1066				
Cor Total	2.67	11					
Linear							
Intercept	3.34						
A-PregelTemp	0.0964						
B-Drying Temp	-0.5453						
C-CPtime	0.0120						
Viscosity							
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	R ²	Adjusted R ²
Model	10887.63	3	3629.21	4.81	0.0337	0.6432	0.5095
A-PregelTemp	321.93	1	321.93	0.4265	0.5320		
B-Drying Temp	7683.25	1	7683.25	10.18	0.0128		
C-CPtime	35.01	1	35.01	0.0464	0.8349		
Residual	6038.35	8	754.79				
Lack of Fit	6036.07	4	1509.02	2641.74	0.1117		
Pure Error	2.28	4	0.5712				
Cor Total	16925.98	11					
Linear							
Intercept	296.60						
A-PregelTemp	-12.97						
B-Drying Temp	-52.30						
C-CPtime	3.53						



شکل ۳. نتایج داده‌های پیش‌بینی شده و داده‌های آزمایشگاهی برای پارامترهای رئولوژیکی مدل‌های مورد مطالعه
 Fig 3. The results of predicted and experimental data for the rheological parameters of the studied models



جدول ۴. معناداری نتایج پیش‌بینی پارامترهای مدل‌های رئولوژیکی

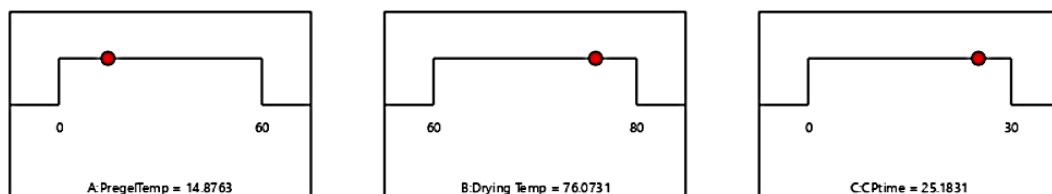
Table 4. The significance of the prediction results of the parameters of the rheological models

Model	R-squared	MAE	DF	Sig.
n.Power-Model_1	0.77	0.185	17	.047
k.Power-Model_2	0.68	0.221	17	.050
n.Casson-Model_3	0.55	0.388	17	.053
k.Casson-Model_4	0.45	0.27	18	.081
n.H.B-Model_5	0.89	0.238	17	.05
k.H.B-Model_6	0.93	0.283	17	.036

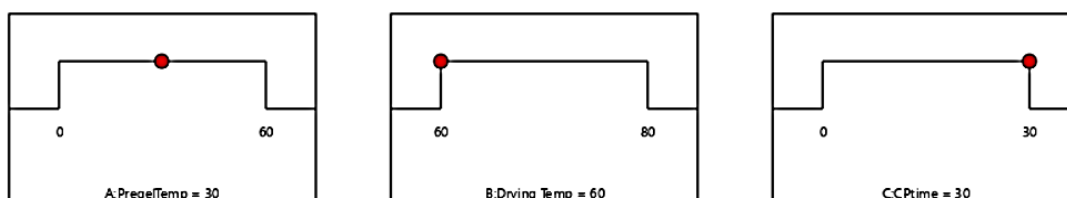
۶.۳. بهینه‌سازی عددی رفتار رئولوژیکی و ویسکوزیته نشاسته‌های تیمار شده

حالت رقیق‌شونده با برش، نیوتنی و غلیظ‌شونده با برش بود. برای بهینه‌سازی ویسکوزیته نیز با توجه به آنکه نشاسته در صنایع مختلف از نظر ویسکوزیته کاربردهای مختلفی خواهد داشت، هدف دستیابی به شرایط بهینه برای بیشترین و کمترین میزان ویسکوزیته بود. نتایج بهینه‌سازی عددی این پنج حالت در شکل ۴ نشان داده می‌شود:

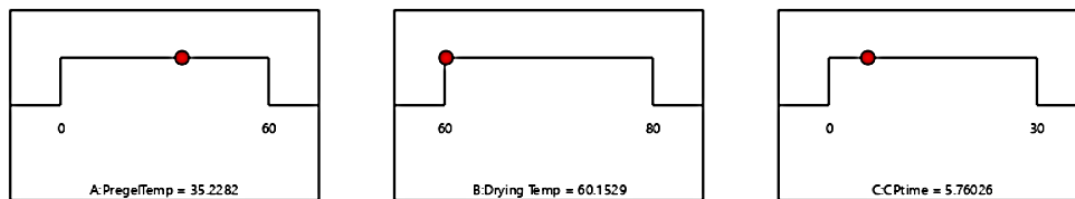
در این مطالعه مشخص شد که هر کدام از شرایط مختلف می‌توانند رفتار رئولوژیکی متفاوتی از نیوتنی و غیرنیوتنی در دیسپرسیون ۲٪ نشاسته ایجاد کنند؛ از این رو، یافتن شرایط تیمار برای مشخص‌شدن این رفتار چندگانه ضروری می‌نماید؛ لذا برای این کار مقدار اندیس جریان (n) قانون توان و ویسکوزیته مورد بهینه‌سازی قرار گرفتند. در بهینه‌سازی n، هدف تعیین شرایط مناسب برای ایجاد سه



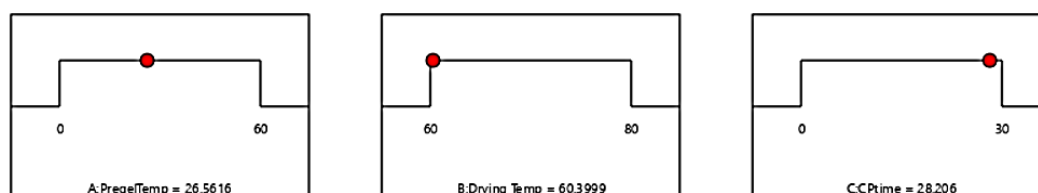
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

شکل ۴. شرایط بهینه‌سازی اندیس n برای حالت رقیق‌شونده با برش (a) نیوتنی (b)، غلیظ‌شونده با برش (c)، بیشترین ویسکوزیته (d) و کمترین ویسکوزیته (e) در دیسپرسیون نشاسته اصلاح‌شده با تیمارهای مورد مطالعه

Fig 4. Conditions for optimizing the index n for pseudoplastic (a) Newtonian (b), rheoplectic (c) state of starch, and the highest viscosity (d) and the lowest viscosity (e) in the modified starch dispersion with the studied treatments

۴. نتیجه‌گیری

بررسی اثر تیمار پلاسمای سرد بر ویژگی‌های رئولوژیکی نشاسته سیب‌زمینی نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه دما و زمان تیمار بر رفتار ویسکوزیته و ساختار مولکولی نشاسته است. نتایج به‌دست‌آمده تأکید می‌کنند که تیمار با پلاسمای سرد به‌ویژه دمای کمتر از 60°C اثر معناداری بر کاهش پارامترهای رئولوژیکی نظیر ویسکوزیته و قوام نشاسته دارد. این تغییرات در ویژگی‌های رئولوژیکی، به‌دلیل اثرات شیمیایی و فیزیکی ناشی از گونه‌های فعال پلاسمای سرد با گرانول‌های نشاسته، نظیر تغییر در سطح گرانول‌ها، ایجاد حفرات و افزایش جذب آب در آن‌ها رخ می‌دهد. همچنین

طبق این شکل، برای ایجاد حالت رقیق‌شونده با برش در نشاسته سیب‌زمینی، دمای پری-ژلاتینه نزدیک 15°C ، دمای خشک‌کردن 76°C و زمان تیمار با پلاسمای سرد حدود ۲۵ دقیقه لازم است. این شرایط برای ایجاد حالت نیوتنی به‌ترتیب عبارت‌اند از 30°C ، 60°C و ۳۰ دقیقه. برای ایجاد حالت غلیظ‌شونده با برش حدود 35°C ، 60°C و ۶ دقیقه. همچنین برای ایجاد بیشترین ویسکوزیته لازم است تا نمونه در دمای 27°C پری ژلاتینه‌شده و سپس حدود ۲۸ دقیقه تحت تیمار پلاسمای سرد قرار گیرد و بعد در دمای حدود 60°C خشک شود. این شرایط به ترتیب برای ایجاد کمترین ویسکوزیته در نشاسته اصلاح‌شده، به‌ترتیب عبارت‌اند از 60°C ، 80°C و حدود ۱۴ دقیقه.



نشاسته به دست می‌دهد، بلکه راهکارهایی برای بهینه‌سازی فرایندهای صنعتی مرتبط با تولید و کاربرد این نوع نشاسته را نیز فراهم می‌کند.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

مراجع

- [1]. Navaf, M., Sunooj, K. V., Krishna, N. U., Aaliya, B., Sudheesh, C., Akhila, P. P., . . . George, J. (2022). Effect of different hydrothermal treatments on pasting, textural, and rheological properties of single and dual modified *Corypha Umbraculifera* L. starch. *Starch-Stärke*, 74(3-4) 2100236.
- [2]. Zehra, N., Ali, T. M., & Hasnain, A. (2020). Comparative study on citric acid modified instant starches (alcoholic alkaline treated) isolated from white sorghum and corn grains. *International Journal of Biological Macromolecules*, 150, 1331-1341.
- [3]. Banura, S., Thirumdas, R., Kaur, A., Deshmukh, R., & Annapure, U. (2018). Modification of starch using low pressure radio frequency air plasma. *Lwt*, 89, 719-724.
- [4]. Zou, J.-J., Liu, C.-J., & Eliasson, B. (2004). Modification of starch by glow discharge plasma. *Carbohydrate polymers*, 55(1), 23-26.
- [5]. Zhang, J., Tao, L., Yang, S., Li, Y., Wu, Q., Song, S., & Yu, L. (2023). Water absorption behavior of starch: A review of its determination methods, influencing factors, directional modification, and food applications. *Trends in Food Science & Technology*, 104321.
- [6]. Chang, R., Lu, H., Tian, Y., Li, H., Wang, J., & Jin, Z. (2020). Structural modification and functional improvement of starch nanoparticles using vacuum cold plasma. *International Journal of Biological Macromolecules*, 145, 197-206.
- [7]. Compart, J., Singh, A., Fettke, J., & Apriyanto, A. (2023). Customizing starch properties: A review of starch modifications and their applications. *Polymers*, 15(16), 3491.

مشخص شد اصلاح نشاسته از طریق تیمار با پلاسمای سرد موجب بهبود خواص عملکردی آن، به‌ویژه آب‌دوستی و حلالیت می‌شود. علاوه‌براین، اثر دما در فرایندهای پیش‌ژلاتینه و خشک‌کردن، به وضوح مشاهده می‌شود و نشان‌دهنده اهمیت کنترل شرایط در به‌دست‌آوردن ساختاری بهینه برای نشاسته‌های تیمار شده است. شواهد حاصل از این مطالعه نه‌تنها درک بهتری از رفتار رئولوژیکی

- [8]. Thirumdas, R., Kadam, D., & Annapure, U. (2017). Cold plasma: An alternative technology for the starch modification. *Food biophysics*, 12, 129-139.
- [9]. Misra, N., Pankaj, S., Segat, A., & Ishikawa, K. (2016). Cold plasma interactions with enzymes in foods and model systems. *Trends in Food Science & Technology*, 55, 39-47.
- [10]. Okyere, A. Y., Rajendran, S., & Annor, G. A. (2022). Cold plasma technologies: Their effect on starch properties and industrial scale-up for starch modification. *Current Research in Food Science*, 5, 451-463.
- [11]. Pankaj, S. K., Wan, Z., & Keener, K. M. (2018). Effects of cold plasma on food quality: A review. *Foods*, 7(1), 4.
- [12]. Ranjbar Nedamani, A. (2023). Optimization of Determined Pathogenes Deactivation and Investigating the Quality of Bottled Milk under Cold-Plasma Treatment. *Research and Innovation in Food Science and Technology*, 12(3), 329-342. 10.22101/jrifst.2023.378738.1422
- [13]. Ranjbar Nedamani, A., & Hashemi, S. J. (2022). Energy consumption computing of cold plasma-assisted drying of apple slices (Yellow Delicious) by numerical simulation. *Journal of Food Process Engineering*, 45(5), e14019. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14019>
- [14]. Carvalho, A. P. M. G., Barros, D. R., da Silva, L. S., Sanches, E. A., da Costa Pinto, C., de Souza, S. M., . . . Campelo, P. H. (2021). Dielectric barrier atmospheric cold plasma applied to the modification of Ariá (*Goeppertia allouia*) starch: Effect of plasma generation voltage. *International Journal of Biological Macromolecules*, 182, 1618-1627.

- [15]. Ge, X., Shen, H., Sun, X., Liang, W., Zhang, X., Sun, Z., . . . Li, W. (2022). Insight into the improving effect on multi-scale structure, physicochemical and rheology properties of granular cold water soluble rice starch by dielectric barrier discharge cold plasma processing. *Food Hydrocolloids*, 130, 107732.
- [16]. Sarangapani, C., Devi, Y., Thirundas, R., Annappure, U. S., & Deshmukh, R. R. (2015). Effect of low-pressure plasma on physico-chemical properties of parboiled rice. *LWT-food Science and Technology*, 63(1), 452-460.
- [17]. Zhang, B., Xiong, S., Li, X., Li, L., Xie, F., & Chen, L. (2014). Effect of oxygen glow plasma on supramolecular and molecular structures of starch and related mechanism. *Food Hydrocolloids*, 37, 69-76.
- [18]. Lii, C.-y., Liao, C.-d., Stobinski, L., & Tomasik, P. (2002). Behaviour of granular starches in low-pressure glow plasma. *Carbohydrate polymers*, 49(4), 499-507.
- [19]. Sabularse, V., Liuzzo, J., Rao, R., & Grodner, R. (1992). Physicochemical characteristics of brown rice as influenced by gamma irradiation. *Journal of Food Science*, 57(1), 143-145.
- [20]. Michel, J., Raffi, J., Saint-Lébe, L., Huchette, M., & Fleche, G. (1980). Experimental study of the depolymerization of starch under the combined action of protons and gamma radiation. *Starch-Stärke*, 32(10), 340-344.
- [21]. Ai, Y., & Jane, J.-l. (2024). Understanding starch structure and functionality. In *Starch in food* (pp. 55-77): Elsevier.
- [22]. Amiri Aghdaei, S., Aalami, M., Babaei Geefan, S., & Ranjbar, A. (2014). Application of Isfarzeh seed (*Plantago ovate* L.) mucilage as a fat mimetic in mayonnaise. *Journal of Food Science and Technology*, 51, 2748-2754.
- [23]. Bertuzzi, M. A., Armada, M., & Gottifredi, J. (2007). Physicochemical characterization of starch based films. *Journal of food engineering*, 82(1), 17-25.
- [24]. Shanbhag, C., Shenoy, R., Shetty, P., Srinivasulu, M., & Nayak, R. (2023). Formulation and characterization of starch-based novel biodegradable edible films for food packaging. *Journal of Food Science and Technology*, 60(11), 2858-2867.
- [25]. Bie, P., Pu, H., Zhang, B., Su, J., Chen, L., & Li, X. (2016). Structural characteristics and rheological properties of plasma-treated starch. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 34, 196-204.
- [26]. Zhang, B., Chen, L., Li, X., Li, L., & Zhang, H. (۲۰۱۵). Understanding the multi-scale structure and functional properties of starch modulated by glow-plasma: A structure-functionality relationship. *Food Hydrocolloids*, 50, 228-236.
- [27]. Li, W., Shu, C., Zhang, P., & Shen, Q. (2011). Properties of starch separated from ten mung bean varieties and seeds processing characteristics. *Food and Bioprocess Technology*, 4, 814-821.
- [28]. Wongsagonsup, R., Deeyai, P., Chaiwat, W., Horrungsawat, S., Leejariensuk, K., Suphantharika, M., . . . Dangtip, S. (2014). Modification of tapioca starch by non-chemical route using jet atmospheric argon plasma. *Carbohydrate polymers*, 102, 790-798.
- [29]. Juszczak, L., Witczak, M., Ziêba, T., & Fortuna, T. (2012). Rheological behaviour of heated potato starch dispersions. *International Agrophysics*, 26.(۴)
- [30]. Lewandowicz, J., Le Thanh-Blicharz, J., & Szwengiel, A. (2022). The effect of chemical modification on the rheological properties and structure of food grade modified starches. *Processes*, 10(5), 938.
- [31]. Szczesniak, A. S. (2002). Texture is a sensory property. *Food quality and preference*, 13(4), 215-225.
- [32]. Zia-ud-Din, Xiong, H., & Fei, P. (2017). Physical and chemical modification of starches: A review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 57(12), 2691-2705.
- [33]. Fu, Z.-q., Che, L.-m., Li, D., Wang, L.-j., & Adhikari, B. (2016). Effect of partially gelatinized corn starch on the rheological properties of wheat dough. *LWT-food Science and Technology* 66, 324 - 331.



[34]. Gao, S., Liu, H., Sun, L., Liu, N., Wang, J., Huang, Y., . . . Zhang, X. (2019). The effects of dielectric barrier discharge plasma on physicochemical and digestion properties of starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, 138, 819-830.

[35]. Jaddu, S., Abdullah, S., Dwivedi, M., & Pradhan, R. C. (2022). Multipin cold plasma electric discharge on hydration properties of kodo millet flour: Modelling and optimization using response surface methodology and artificial neural network–Genetic algorithm. *Food Chemistry: Molecular Sciences*, 5, 100132.