

## Prediction and Optimization of Rheological Parameters of Potato Starch Modified by Cold Plasma

Ali Taghavi<sup>1</sup>, Azadeh Ranjbar Nedamani<sup>2\*</sup>, Ali Motevali<sup>3</sup>, Seyyed Jafar Hashemi<sup>4</sup>

1. MSC Student of Post-Harvest Technologies, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Iran.

2. Assistant Professor, 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 Data: 18 January 2025

Revised Data: 9 February 2025

Accepted Data: 11 February 2025

Please cite this article as Ali Taghavi, Azadeh Ranjbar Nedamani, Ali Motevali, Seyyed Jafar Hashemi., Prediction and Optimization of Rheological Parameters of Potato Starch Modified by Cold Plasma., *Innovative Food Technologies* (2025).

doi: <https://doi.org/10.22104/ift.2025.7349.2194>

This is a PDF file of an article that has undergone enhancements after acceptance, such as the addition of a cover page and metadata, and formatting for readability, but it is not yet the definitive version of record. This version will undergo additional copyediting, typesetting and review before it is published in its final form, but we are providing this version to give early visibility of the article. Please note that, during the production process, errors may be discovered which could affect the content, and all legal disclaimers that apply to the journal pertain.

© 2025 The Author(s). Published by irost.org.

\* Corresponding author: [a.ranjbar@sanru.ac.ir](mailto:a.ranjbar@sanru.ac.ir)



### Abstract:

**Introduction:** Starch is an important material in the production of various food products, which has various functional properties depending on the source. However, the use of natural starch in industry has always faced challenges. For example, the low temperature of starch paste formation, low tolerance of natural starch to various processes, low hardness of the gel formed from it, etc., which ultimately limits the use of natural starch in industry, especially the food industry. For this reason, starch modification is one of the processes that is carried out after its extraction with the help of chemical, physical, enzymatic and thermal methods. This causes changes in the functional properties of starch and, depending on the modification conditions, the extent of its application in the food industry. Plasma active species interact with starch and modify starch through three possible mechanisms such as crosslinking, depolymerization and granule surface removal.

**Materials and Methods:** Potato starch powder was obtained from Zamen Food Products Manufacturing Company located in Mashhad Industrial City, Iran in plastic packaging without being in contact with the outside air. For the treatment of starch with cold plasma, a homemade cold plasma generator was used. This device includes a cold plasma generator section and a sample storage section that is capable of producing cold plasma and direct contact of the sample with ionized air in this way. Using a plasma reactor including copper and steel electrodes, a voltage of 20 kV, a current of 3 mA with 50 HZ, was produced and collided with the sample with the help of atmospheric air. In the preparation of starch samples, a randomized complete factorial experimental design was implemented with the factors of pre-gelatinization temperature (60, 55 and 0 °C), cold plasma treatment time (30, 15 and 0 min), and starch drying temperature (80, 70 and 60 °C). Then, a 2% (w/w) suspension of potato starch was kept at 100°C for 1 hour. Vortexing was performed every 5 minutes and after one hour, the samples were cooled to room temperature (25°C). The shear flow behavior due to shear stress in the starch dispersion of 2% at 25°C was determined using a viscometer made in the country Spain. with the help of a spindle No 3 . The range of stress applied to the dispersion was from 0 to 200 inverse seconds in an incremental manner and the strain data were recorded. Then, the fluid flow behavior was analyzed with the help of rheological models. The flow behavior of the starch dispersion of 2% was fitted with the power law, Herschel-Bulkley and Kesson rheological models using the soft regression toolbox of SPSS 20 software.

**Results and Discussion:** The Herschel-Bulkley model was able to fit the data more accurately in most cases, although in some treatments, the power law and the Casson model also fitted well. This means that the type of treatment can cause a variety of behaviors from Newtonian to non-Newtonian thinning in the starch fluid. In general, with increasing pregelatinization temperature, the final viscosity of the starch samples decreased. However, the value of the coefficient  $k$  in the samples that were not pregelatinized increased with increasing plasma treatment time from zero to 15 minutes. The coefficient  $n$  in the samples that were not pregelatinized increased with increasing other factors, but in the samples that were pretreated at 55 °C, it decreased with increasing other factors. At the pregelatinization temperature of 60°C,  $n$  was constant but generally lower than the  $n$  of other pregelatinization treatments. Drying temperature generally decreased the viscosity of the samples. However, at each temperature, the effect of pregelatinization temperature and cold plasma treatment time on viscosity changes was significant. Coefficients such as  $k$  and  $n$  also decreased with increasing drying temperature. Increasing plasma treatment time decreased viscosity

and  $k$  in the samples. However, significant fluctuations in the value of  $n$  were observed. For example, in samples that did not receive plasma treatment, pregelatinization and drying at the lowest temperature caused Newtonian to shear-thickening behavior ( $n=1.1$ ) in the fluid. However, increasing the drying temperature at the same pregelatinization temperature caused  $n$  to decrease to about 0.83. In contrast, in samples that received 15 minutes of plasma treatment, the important factor affecting the changes in  $n$  was the drying and pregelatinization temperature. Finally, in samples that received the longest cold plasma treatment time, i.e. 30 minutes, increasing the drying and pregelatinization temperatures caused a decrease in  $n$  and a change in the fluid behavior from Newtonian to shear-thinning.

**Conclusion:** The study of the effect of cold plasma treatment on the rheological properties of potato starch indicates a significant effect of temperature and treatment time on the viscosity behavior and molecular structure of starch. The results obtained emphasize that cold plasma treatment, especially at temperatures below 60 °C, has a significant effect on reducing rheological parameters such as starch viscosity and consistency. These changes in rheological properties occur due to the chemical and physical effects of cold plasma active species on starch granules, such as changes in the surface of the granules, the creation of pores, and increased water absorption in them. It was also found that starch modification through cold plasma treatment leads to improvements in its functional properties, especially hydrophilicity and solubility. In addition, the effect of temperature in the pregelatinization and drying processes is clearly observed, indicating the importance of controlling conditions in obtaining an optimal structure for the treated starches. The evidence from this study not only provides a better understanding of the rheological behavior of starch, but also provides solutions for optimizing industrial processes related to the production and application of this type of starch.

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

## پیش‌بینی و بهینه‌سازی پارامترهای رئولوژیکی نشاسته سیب‌زمینی اصلاح شده با پلاسمای سرد

علی تقوی<sup>۱</sup>، آزاده رنجبر ندامانی<sup>۲\*</sup>، علی متولی<sup>۳</sup>، سید جعفر هاشمی<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد فناوری‌های پس از برداشت، 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.

۴. دانشیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی 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 پلاسمای شامل الکترودهای مسی و فولادی، ولتاژ ۲۰ kV، و جریان ۳ mA دارای ۵۰ Hz، با کمک هوای اتمسفر تولید و با نمونه برخورد کرد. سپس رفتار جریان دیسپرسیون<sup>۱</sup> ۲۱ درصد نشاسته با مدل‌های رئولوژیکی قانون توان، هرشل-بالکلی و کسون با کمک جعبه ابزار نرم رگرسیون نرم‌افزار SPSS 20 برازش شدند. نتایج نشان دادند مدل هرشکل-بالکلی توانسته است در بیشتر موارد برازش دقیق‌تری با داده‌ها داشته باشد. با افزایش دمای پیش ژلاتینه شدن، ویسکوزیته نهایی نمونه‌های نشاسته کاهش یافته است. ضریب n در نمونه‌هایی که پیش ژلاتینه نشده بودند، با افزایش سایر فاکتورها افزایش یافت اما در نمونه‌هایی که در دمای ۵۵°C پیش تیمار شده بودند، با افزایش سایر فاکتورها کاهش نشان داد. دمای خشک کردن به طور کلی باعث کاهش ویسکوزیته نمونه‌ها شد. در هر دما، اثر دمای پیش ژلاتینه و زمان تیمار با پلاسمای سرد بر تغییرات ویسکوزیته معنادار بود. ضرایبی مانند k و n نیز با افزایش دمای خشک کردن، 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 خشک کردن و دمای پری ژلاتینه کردن باعث کاهش n و تغییر رفتار سیال از حدود نیوتنی، به رقیق شونده با برش شد. نتایج این پژوهش نشان دهنده اثر تیمار پلاسمای سرد بر رفتار رئولوژیکی نشاسته سیب‌زمینی بوده و راهکارهایی برای بهینه‌سازی فرآیندهای صنعتی مرتبط با تولید و کاربرد این نوع نشاسته را نیز فراهم کرده است.

**کلمات کلیدی:** نشاسته سیب‌زمینی، اصلاح نشاسته، پلاسمای سرد، رئولوژی، دیسپرسیون نشاسته

<sup>1</sup> Dispersion

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 روبرو بوده است. برای مثال دمای پایین تشکیل خمیر نشاسته، تحمل اندک نشاسته طبیعی به فرآیندهای مختلف، سختی کم ژل تشکیل شده از آن و غیره، که در نهایت باعث محدودیت استفاده از نشاسته طبیعی در صنعت به ویژه صنایع غذایی شده است (Navaf et al., 2022; Zehra, Ali, & Hasnain, 2020). به همین دلیل اصلاح نشاسته یک از فرآیندهایی است که بعد از استخراج آن با کمک روش‌های شیمیایی، فیزیکی، آنزیمی و حرارتی انجام می‌شود. این امر باعث تغییر در ویژگی‌های عملکردی نشاسته و بسته به شرایط اصلاح، گستردگی کاربرد آن در صنعت غذا می‌شود (Banura, Thirumdas, Kaur, Deshmukh, & Annapure, 2018; J. Zhang et al., 2023; Zou, Liu, & Eliasson, 2004).

تقاضای رو به رشد 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 روبرو 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 (Chang et al., 2020; Compart, Singh, Fettke, & Apriyanto, 2023).

عبارت پلاسما اولین بار توسط اروینگ لانگمیر در سال ۱۹۲۸ برای تعریف حالت چهارم ماده استفاده شد. در این حالت، ماده که اغلب گاز برانگیخته شده با نیروی الکتریکی ولتاژ بالا و جریان کم است، گونه‌های مختلف فعال موسوم به گونه‌های پلاسما در گاز ایجاد می‌شود. 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 و به ویژه در پلاسما سرد، دارای ذرات با دمای پایین موسوم به مولکول‌های خنثی، گونه‌های اتمی مختلف، و تاحدودی الکترون‌های با دمای بالا است (Thirumdas, Kadam, & Annapure, 2017). مشخص شده است که پلاسما سرد کمترین اثرات جانبی سلامتی و زیست محیطی دارد. چراکه یونیزاسیون گاز در این فرآیند، مهمترین عاملی است در کنار برانگیختگی یونی، تجزیه یونی، شکسته شدن مولکول و بازبرانگیختگی می‌تواند در نقض مهم پلاسما سرد بر بسیاری از مطالعات انجام شده در حوزه مواد غذایی اثرگذار باشد (Misra, Pankaj, Segat, & Ishikawa, 2016; Okyere, Rajendran, & Annor, 2022; Pankaj, Wan, & Keener, 2018; Ranjbar Nedamani, 2023; Ranjbar Nedamani & Hashemi, 2022). گونه‌های فعال پلاسما، با نشاسته برهمکنش داده و از طریق سه مکانیسم احتمالی مانند اتصال عرضی، دپلمیریزه کردن و کندن سطح گرانول، باعث اصلاح نشاسته می‌شود (Carvalho et al., 2021; Thirumdas et al., 2017). علاوه بر این، 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 (Ge et al., 2022). دپلمیریزه شدن و تکه شدن آمیلوز و آمیلوپکتین که یکی از نتایج تیمار نشاسته با پلاسما سرد است (Sarangapani, Devi, Thirumdas, Annapure, & Deshmukh, 2018).

به شدت بر ویسکوزیته نشاسته اثر می‌گذارد. ویسکوزیته یکی از فاکتورهای مهمی است که به عنوان ویژگی رئولوژیکی نشاسته اندازه‌گیری می‌شود چراکه نشاسته به عنوان یک عامل ضخیم‌کننده در بسیاری از محصولات غذایی کاربرد دارد (Thirumdas et al., 2017). لی و همکاران (۲۰۰۲) به بررسی ویسکوزیته نشاسته سیب‌زمینی تیمار شده با اتیلن فعال شده با پلاسمای سرد پرداختند و گزارش دادند که دلیل دپلمریزه شدن، ۳۳٪ کاهش ویسکوزیته بعد از تیمار رخ داده است و بیشترین کاهش زمانی رخ داد که نمونه‌ها با پلاسمای اکسیژن تیمار شده بودند (Lii, Liao, Stobinski, & Tomasik, 2002). سابولارز و همکاران (۱۹۹۲) نیز چنین گزارش دادند (Sabularse, Liuzzo, Rao, & Grodner, 1992). از طرفی میشل و همکاران (۱۹۸۰) بیان کردند که ویسکوزیته با تعداد گروه‌های احیاکننده و درجه دپلمریزه شدن نشاسته رابطه عکس دارد (Michel, Raffi, Saint-Lèbe, Huchette, & Fleche, 1980). 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 (Ai & Jane, 2024). همانند سایر روش‌های فیزیکی اصلاح نشاسته، پلاسمای سرد می‌تواند بر ویسکوزیته آن اثر بگذارد. به همین دلیل بررسی رفتار جریان سیال بعد از تیمار با پلاسمای سرد اهمیت بالایی داشته و هدف از این تحقیق تعیین اثر پلاسمای سرد، نقش پیش‌ژلاتینه کردن و تیمار پلاسمای سرد و در نهایت دمای خشک کردن نشاسته بر ویژگی‌های رئولوژیکی نشاسته سیب‌زمینی می‌باشد.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲-۱- پودر نشاسته

پودر نشاسته سیب زمینی از شرکت تولیدی محصولات غذایی ضامن واقع در ایران شهرک صنعتی مشهد در بسته بندی پلاستیکی بدون آنکه با هوای بیرون در تماس باشد تهیه شد.

### ۲-۲- تیمار با پلاسمای سرد

برای تیمار نشاسته با پلاسمای سرد، از دستگاه مولد پلاسمای سرد دست‌ساز استفاده شد. این دستگاه شامل بخش مولد پلاسمای سرد و بخش نگهداری نمونه است که قادر به تولید پلاسمای سرد و تماس مستقیم نمونه با هوای یونیزه شده از این طریق می‌باشد. با استفاده از یک راکتور پلاسمای شامل الکترودهای مسی و فولادی، ولتاژ ۲۰ kV، با جریان ۳ mA دارای ۵۰ HZ، با کمک هوای اتمسفر تولید و با نمونه برخورد می‌کرد. در تهیه نمونه‌های نشاسته، طرح آزمایشات فاکتوریل کامل به صورت تصادفی با فاکتورهای دمای پیش‌ژلاتینه (۶۰، ۵۵ و ۰ °C)، زمان تیمار با پلاسمای سرد (۳۰، ۱۵ و ۰ min) و دمای خشک کردن نشاسته (۸۰، ۷۰ و ۶۰ °C) طبق جدول ۱ اجرا شد.

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

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

### ۲-۳- آماده‌سازی نمونه‌ها

با کمک تراوزی دیجیتال (بادقت ۰/۰۰۱ گرم)، مقدار ۱۰ گرم نشاسته در ۹۰ گرم آب مقطر ریخته و یک محلول ۱۰٪ (w/w) تهیه شد. نمونه‌هایی که باید تیمار پری ژل دریافت می‌کردند، تا دمای مورد نظر پری ژل 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 مورد نظر جدول ۱، در آون هوای گرم اف جی فن دار مدل BM55E تا رسیدن به وزن ثابت خشک شدند. نمونه‌های خشک شده توسط آسیاب پودر شده و جهت انجام آزمون رئولوژیکی، در دمای محیط در بسته بندی های پلاستیکی نفوذ ناپذیر به هوا و نور، نگهداری شدند.

### ۲-۴- 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 (۲۵°C) خنک شدند.

### ۲-۵- آزمون رئولوژیکی

رفتار جریان برشی ناشی از تنش برشی در دیسپرسیون نشاسته ۲٪ در دمای ۲۵°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 (Amiri Aghdaei, Aalami, Babaei Geefan, & Ranjbar, 2014).

## ۲-۶- مدل‌سازی رئولوژیکی

رفتار جریان دیسپرسیون ۱,۵ درصد نشاسته با مدل‌های رئولوژیکی قانون توان<sup>۲</sup>(معادله ۱)، هرشل-بالکلی<sup>۳</sup>(معادله ۲) و کسون<sup>۴</sup>(معادله ۳) با کمک جعبه ابزار نرم رگرسیون نرم‌افزار SPSS 20 برازش شدند.

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

که در آن  $\tau$  مقدار تنش برشی (Pa)،  $k$  شاخص قوام ( $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ )،  $n$  اندیس رفتار جریان سیال (بدون بعد) و  $\dot{\gamma}$  نرخ برشی ( $\text{s}^{-1}$ ) است.

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

که در آن  $\tau_0$  تنش تسلیم می‌باشد.

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

## ۲-۷- عکس برداری SEM

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

## ۲-۸- 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

<sup>2</sup>Power law

<sup>3</sup>Herschel-Bulkley

<sup>4</sup>Casson



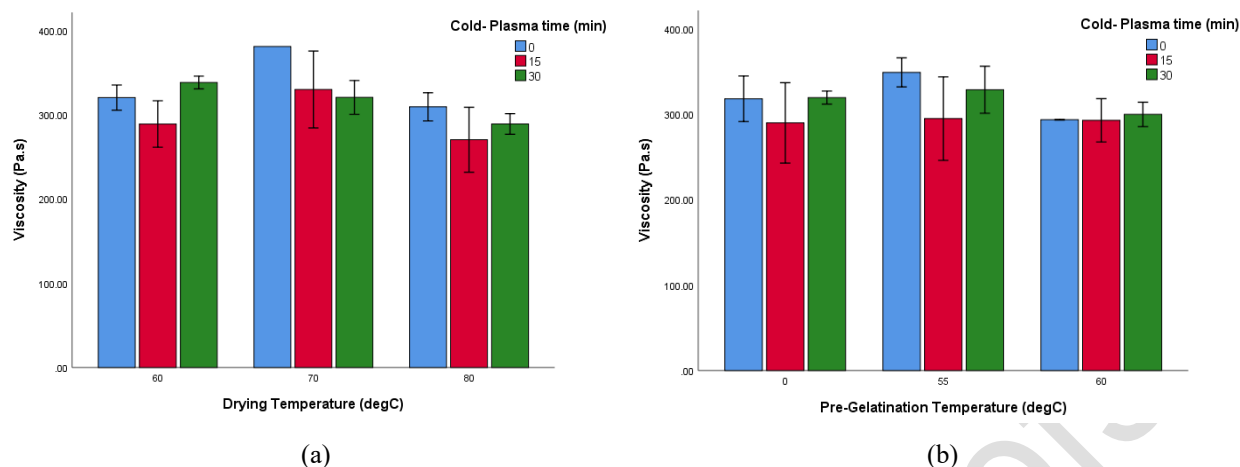
رئولوژیکی بر اساس آنالیز کای-اسکوئر در سطح ۵٪ معناداری بررسی شد. برای پیش‌بینی پارامترهای رئولوژیکی از جعبه پیش‌بینی نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۰ استفاده شد.

### ۳. نتایج و بحث

در تحلیل علمی داده‌های رئولوژیکی، ارتباط بین تیمارها و نتایج رئولوژیکی بررسی می‌شوند. این تحلیل شامل بررسی اثر دماهای مختلف پیش ژلاتینه شدن و خشک کردن نشاسته و همچنین زمان‌های مختلف تیمار با پلاسمای سرد بر روی رفتار رئولوژیکی نمونه‌ها می‌باشد.

#### ۳-۱- ویسکوزیته دیسپرسیون نشاسته

خمیر نشاسته به عنوان یک سیال غیرنیوتنی، شبه پلاستیک و تیکسوتروپ شناخته می‌شود و مقادیر قوام و شاخص رفتار جریان آن تابع عوامل مختلفی می‌باشد. در شکل ۱ اثر زمان تیماردهی با پلاسمای سرد، دمای پیش ژلاتینه کردن، و دمای خشک کردن نشاسته به صورت اثر متقابل بر ویسکوزیته دیسپرسیون نشاسته نشان داده می‌شود. همانگونه که مشاهده می‌شود، در دمای پیش ژلاتینه  $60^{\circ}\text{C}$  اثر تیمار با پلاسمای سرد بر ویسکوزیته معنادار نبوده و نمونه‌های تیمار شده، ویسکوزیته مشابهی با نمونه شاهد داشتند (شکل ۱- b). اما در دمای پیش ژلاتینه شدن  $55^{\circ}\text{C}$  و همچنین در نمونه‌های که تیمار پیش ژلاتینه دریافت نکرده بودند، نوساناتی در ویسکوزیته نمونه‌ها دیده شد. هرچند این نوسانات در مجموع معنادار نبودند. از طرفی با مقایسه کلی اثر تیمار پلاسمای سرد و دمای پیش ژلاتینه می‌توان استنتاج کرد تیمار با پلاسمای 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  $80^{\circ}\text{C}$  و  $70^{\circ}\text{C}$  افزایش زمان تیمار با پلاسمای 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 نشان دهنده همبستگی مناسب بین داده‌ها بوده و دقت محاسبه ویسکوزیته هر نمونه بالا می‌باشد. نتایج بررسی فاکتورهای مؤثر بر ویسکوزیته نشان داد هرچند تیمارهای مختلفی بر روی نمونه نشاسته سبب زمینی انجام شده است، اما دمای خشک کردن نشاسته اثر معنادار ( $p < 0/05$ ) بر ویسکوزیته داشت و در این مورد سایر فاکتورها معنادار نبودند.



شکل ۱- اثر متقابل زمان پلاسمای سرد و دمای خشک کردن (a) و زمان پلاسمای سرد و دمای پیش ژلاتینه کردن (b) بر ویسکوزیته نشاسته سیب زمینی

Figure 1 - Interaction of cold plasma time and drying temperature (a) and cold plasma time and pregelatinization temperature (b) on the viscosity of potato starch

جدول ۱ مقادیر قوام سیال (k) و شاخص رفتار جریان سیال (n) حاصل از برازش داده‌های مربوط به معادلات قانون توان، سیال هرشل-بالکلی و سیال کسون را به همراه مقادیر ضریب تبیین هر معادله خط برازش شده نشان می‌دهد. ضریب تبیین دامنه‌ای بین ۰/۶۳ تا ۰/۹۹ داشته است. هرچه ضریب تبیین به ۱ نزدیکتر باشد، مدل به خوبی با داده‌ها تناسب دارد. همچنین ویسکوزیته سیال مقداری بین ۲۱۳/۱۵ تا ۳۸۰/۶ می‌باشد که علت آن ماهیت نمونه ناشی از نوع تیمار می‌باشد. مقدار k در مدل توان عددی بین ۲/۱۷ Pa.s<sup>n</sup> تا ۳/۹۶، در مدل هرشل-بالکلی بین ۳/۲ Pa.s<sup>n</sup> تا ۴/۳۴ و در مدل کسون بین ۱۶/۲۴ Pa.s<sup>n</sup> الی ۲۷/۴ می‌باشد. 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 (شبه پلاستیک) سیال است. برای مثال در مدل توان، R<sup>۲</sup> با مقدار n=۰/۲۵ بیشترین حالت غیرنیوتنی را از خود نشان داده است در حالی بیشتر تیمارهای دیگر دارای n نزدیک به یک هستند.

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 می‌باشد که به معنای رفتار سودوپلاستیک سیال می‌باشد. 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<sup>۳</sup> که کمترین دمای پیش ژلاتینه شدن را داشته و بدون تیمار با پلاسمای تولید شده است، 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 به خوبی برازش شده‌اند. این بدان معناست که نوع تیمار می‌تواند باعث ایجاد انواع رفتار از نیوتنی تا غیرنیوتنی رقیق شونده در سیال نشاسته باشد.

جدول ۱- پارمترهای مدل‌های قانون توان، هرشل-بالکلی و کسون برای نمونه‌های نشاسته در زمان‌های مختلف تیمار با پلاسمای سرد،

دمای پری ژلاتینه 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	Power law				Herschel-Bulkley				Casson		
	$\mu$	$R^2$	$k$ (Pa.s <sup>n</sup> )	$n$	$R^2$	$k$ (Pa.s <sup>n</sup> )	$n$	$R^2$	$k$ (Pa.s <sup>n</sup> )	$n$	$R^2$
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

## ۳-۲- اثر دمای پیش ژلاتینه شدن

طبق تحلیل آماری جدول ۲ و نتایج جدول ۱، می‌توان مشاهده کرد به طور کلی با افزایش دمای پیش ژلاتینه شدن، ویسکوزیته نهایی نمونه‌های نشاسته کاهش یافته است. اما مقدار ضریب  $k$  در نمونه‌هایی که پیش ژلاتینه نشده بودند، با افزایش زمان تیمار با پلاسما از صفر به ۱۵ دقیقه، افزایش یافت. در سایر نمونه‌های پیش ژلاتینه شدن،  $k$  با تغییر فاکتورهای دیگر ثابت ماند. ضریب  $n$  در نمونه‌هایی که پیش ژلاتینه نشده بودند، با افزایش سایر فاکتورها افزایش یافت اما در نمونه‌هایی که در دمای  $55^{\circ}\text{C}$  پیش تیمار شده بودند، با افزایش سایر فاکتورها کاهش نشان داد. در دمای پیش ژلاتینه  $60^{\circ}\text{C}$   $n$  ثابت بود اما به طور کلی، از  $n$  سایر تیمارهای پیش ژلاتینه مقدار کمتری داشت.

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

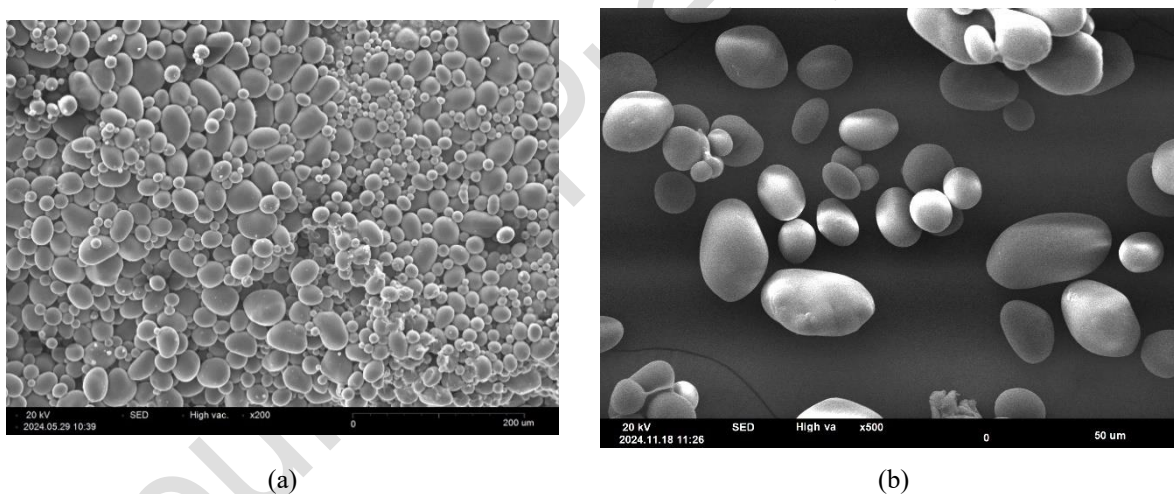
	Pre- Gelatination Temperature (degC) - n.Power	Drying Temperature (degC) - n.Power	Cold- Plasma time (min) - n.Power	Pre- Gelatination Temperature (degC) - k.Power	Drying Temperature (degC) - k.Power
Exact Sig. (2-tailed)	.152 <sup>b</sup>	.000 <sup>b</sup>	.064 <sup>b</sup>	.152 <sup>b</sup>	.000 <sup>b</sup>
	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 <sup>b</sup>	.152 <sup>b</sup>	.000 <sup>b</sup>	.064 <sup>b</sup>	.152 <sup>b</sup>
	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 <sup>b</sup>	.307 <sup>b</sup>	.152 <sup>b</sup>	.000 <sup>b</sup>	.064 <sup>b</sup>
	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 <sup>b</sup>	.000 <sup>b</sup>	.064 <sup>b</sup>	.000 <sup>b</sup>	.000 <sup>b</sup>
Cold- Plasma time (min) - mu					

### ۳-۳- اثر دمای خشک کردن

دمای خشک کردن به طور کلی باعث کاهش ویسکوزیته نمونه‌ها شده است. اما در هر دما، اثر دمای پیش ژلاتینه و زمان تیمار با پلاسمای سرد بر تغییرات ویسکوزیته معنادار است. ضرایبی مانند  $k$  و  $n$  نیز با افزایش دمای خشک کردن، کاهش یافته‌اند.

### ۳-۴- اثر تیمار با پلاسمای سرد

شکل ۲ تصاویر گرانول‌های نشاسته شاهد و تیمار شده با پلاسمای سرد را نشان می‌دهد. گرانول تیمار نشده سطح صاف تری دارند در حالی که تیمار با پلاسمای باعث تغییر در اندازه و تغییراتی در سطح صاف گرانول شد زیرا مشخص شده است که پلاسمای واکنش‌های شیمیایی متوالی مانند باز آرای مولکولی، هیدراته شدن و هیدروژن شدن مولکول‌ها را آغاز می‌کند (Bertuzzi, Armada, & Gottifredi, 2007; Shanbhag, Shenoy, Shetty, Srinivasulu, & Nayak, 2023).



شکل ۲- ساختار گرانولی نشاسته تیمار شده (a) و شاهد (b)

Figure 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 پلاسمای دریافت نکرده بودند، پیش ژلاتینه و خشک کردن در کمترین دما، باعث ایجاد رفتار نیوتنی تا غلیظ شونده با برش ( $n=1/1$ ) در سیال شد. اما افزایش دمای خشک کردن در همین دمای پیش ژلاتینه، باعث کاهش  $n$  تا حدود  $0/83$  شد. در مقابل، در نمونه‌هایی که تیمار ۱۵ دقیقه پلاسمای دریافت کرده بودند، فاکتور مهم تأثیرگذار بر تغییرات  $n$ ، دمای خشک کردن و پری ژلاتینه 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 پری ژلاتینه کردن باعث کاهش  $n$  و تغییر رفتار سیال از حدود نیوتنی، به رقیق شونده با برش شد. بیه و همکاران (۲۰۱۶) از معادله قانون توان برای برازش داده‌های ویسکوزیته نشاسته ذرت تیمار شده به پلاسما DBD استفاده کردند. این نشان می‌دهد نشاسته‌ای که با این روش اصلاح شده بود، دارای ویژگی‌های جریان‌مانند سیالات نیوتنی بود. به این ترتیب می‌توان با اصلاح نشاسته با کمک تیمار پلاسما 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 رقیق شونده 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 (Bie et al., 2016). ژانگ و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی اثر تیمار پلاسما 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 (B. Zhang, Chen, Li, Li, & Zhang, 2015). همچنین آن‌ها مشاهده کردند که پلاسما 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 رترورگرید شدن داشتند (Li, Shu, Zhang, & Shen, 2011). وانگساگنساپ و همکاران (۲۰۱۴) نیز ویژگی‌های ویسکوالاستیک دینامیک (مدول ذخیره، مدول الاستیک؛ و فاکتور اتلاف) نشاسته تاپوکای تیمار شده با پلاسما آرگون را بررسی کرده و دریافتند نمونه‌هایی که در ۵۰ وات تیمار شده بودند، ساختار ژل مستحکم‌تری در مقایسه با نشاسته طبیعی تاپوکا داشتند. از طرف دیگر، تیمار در ۱۰۰ وات به دلیل دپلمریزه کردن نشاسته، باعث کاهش این استحکام شد (Wongsagonsup et al., 2014). جوشاک و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی ویژگی‌های رئولوژیکی دیسپرسیون ۵٪ نشاسته که در دماهای ۹۰، ۸۰ و ۶۵ و به مدت ۵، ۱۵، ۳۰ و ۶۰ دقیقه گرما دیده بودند، پرداختند. آن‌ها دریافتند تمامی نمونه‌های مورد مطالعه رفتار رقیق شونده 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 کسوف افزایش یافته بود. همچنین مشخص شد نمونه‌ها تا دمای ۸۰°C رفتار تیکسوتروپی و در دمای ۹۵°C رفتار آنتی تیکسوتروپی از خود نشان دادند. در این مطالعه به وضوح مشخص شد که دما و زمان حرارت‌دهی تأثیر زیادی بر ویژگی‌های رئولوژیکی نشاسته سیب‌زمینی دارد (Juszczak, Witczak, Zięba, & Fortuna, 2012). لواندوویچ و همکاران (۲۰۲۲) ویژگی‌های رئولوژیکی انواع نشاسته‌های اصلاح شده را مورد بررسی قرار دادند. نشاسته‌های اصلاح شده مانند نشاسته اکسید شده، نشاسته استیل، فسفات دی نشاسته و فسفات دی نشاسته استیل 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 تغلیظ کنندگی بهتری پیدا کرده و علت آن را نوع عامل ایجاد این اتصالات عرضی دانستند (Lewandowicz, Le Thanh-Blicharz, & Szwengiel, 2022). 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 (Szczesniak, 2002). ژیانودین و همکاران (۲۰۱۷) گزارش دادند اصلاح نشاسته به ویژه با روش‌های شیمیایی منجر به تغییرات قابل توجه در خواص مولکولی و کاهش وزن مولکول می‌شود (Zia-ud-Din, Xiong, & Fei, 2017). به همین دلیل می‌توان استنباط کرد این تغییرات ناشی از ویسکوزیته که در اثر فاکتورهای تیمار با پلاسما سرد، دمای 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 میکرو کریستال‌ها می‌شود (Fu, Che, Li, Wang, & Adhikari, 2016). بعد از تیمار پلاسما، سطح گرانول‌ها حفره دار و تکه تکه دیده می‌شود که به دلیل دخالت رادیکال‌های آزاد و انواع گونه‌های فعال تولید شده توسط پلاسما سرد است (Carvalho et al., 2021). با افزایش زمان این تغییرات در سطح بیشتر بود (Gao et al., 2019). 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 می‌باشد. 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، در حالی که کلوخه‌ای شدن گرانول‌ها باعث حفظ یک دستی گرانول‌های نشاسته می‌شود (Jaddu, Abdullah, Dwivedi, & Pradhan, 2022).

### ۳-۵- مدل‌سازی و پیش‌بینی پارامترهای رئولوژیکی

یکی از مسائل مهم در مدل‌سازی‌های رئولوژیکی، امکان پیش‌بینی مدل‌ها و تخمین پارامترهای مورد نظر تحت شرایط مختلف است مدل‌سازی به پژوهشگران این امکان را می‌دهد تا بدون انجام آزمایشات زیاد، تخمین تقریباً دقیقی از پاسخ‌های احتمالی مورد آزمون داشته باشند. لذا پیش‌بینی و تخمین 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 مشاهده رفتار نیوتنی، غلیظ شونده با برش و رقیق شونده 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 نرم افزار 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 نشان می‌دهد علیرغم 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 اصلاح شده استفاده خواهند کرد، آسان خواهد کرد.

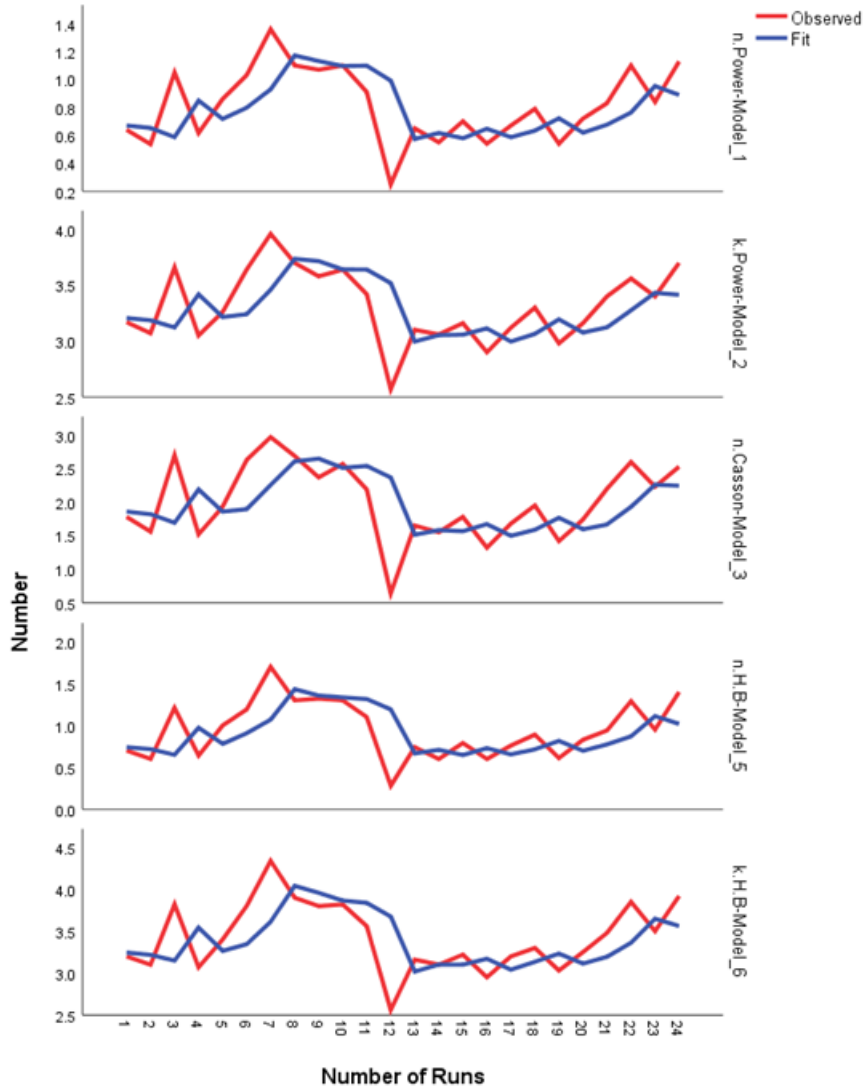
جدول ۳- آنالیز مدل پاسخ‌های  $k$ ،  $n$  و ویسکوزیته معادلات رئولوژیکی توان، کسون و هرشل-بالکلی توسط دیزاین اکسپرت

Table 4- 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 <sup>2</sup>	Adjusted R <sup>2</sup>
<b>Model</b>	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		
<b>Residual</b>	0.3476	8	0.0434				
Lack of Fit	0.1856	4	0.0464	1.15	0.4492		
Pure Error	0.1620	4	0.0405				
<b>Cor Total</b>	1.02	11					
<b>Linear</b>	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 <sup>2</sup>	Adjusted R <sup>2</sup>
<b>Model</b>	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		
<b>Residual</b>	1.58	8	0.1972				
Lack of Fit	0.9998	4	0.2500	1.73	0.3043		
Pure Error	0.5780	4	0.1445				
<b>Cor Total</b>	4.75	11					
<b>Linear</b>							
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 <sup>2</sup>	Adjusted R <sup>2</sup>
<b>Model</b>	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		
<b>Residual</b>	0.5753	5	0.1151				
Lack of Fit	0.2053	1	0.2053	2.22	0.2104		
Pure Error	0.3699	4	0.0925				
<b>Cor Total</b>	1.81	11					
<b>Quadratic</b>							
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 <sup>2</sup>	Adjusted R <sup>2</sup>
<b>Model</b>	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		
<b>Residual</b>	0.5360	8	0.0670				
Lack of Fit	0.3113	4	0.0778	1.39	0.3800		
Pure Error	0.2247	4	0.0562				
<b>Cor Total</b>	1.62	11					
<b>Linear</b>							
Intercept	3.24						
A-PregelTemp	0.0589						
B-Drying Temp	-0.4445						
C-Cptime	0.0128						
<b>k-Casson</b>							
<b>Source</b>	<b>Sum of Squares</b>	<b>df</b>	<b>Mean Square</b>	<b>F-value</b>	<b>p-value</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Adjusted R<sup>2</sup></b>
<b>Model</b>	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		
<b>Residual</b>	29.92	8	3.74				
Lack of Fit	24.51	4	6.13	4.53	0.4069		
Pure Error	5.41	4	1.35				
<b>Cor Total</b>	98.57	11					
<b>Linear</b>							
Intercept	22.27						
A-PregelTemp	-0.1664						
B-Drying Temp	-3.85						
C-Cptime	0.2314						
<b>k-Herschel- Bulkley</b>							
<b>Source</b>	<b>Sum of Squares</b>	<b>df</b>	<b>Mean Square</b>	<b>F-value</b>	<b>p-value</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Adjusted R<sup>2</sup></b>
<b>Model</b>	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		
<b>Residual</b>	0.9742	8	0.1218				
Lack of Fit	0.5479	4	0.1370	1.29	0.4069		
Pure Error	0.4263	4	0.1066				
<b>Cor Total</b>	2.67	11					
<b>Linear</b>							
Intercept	3.34						
A-PregelTemp	0.0964						
B-Drying Temp	-0.5453						
C-Cptime	0.0120						
<b>Viscosity</b>							
<b>Source</b>	<b>Sum of Squares</b>	<b>df</b>	<b>Mean Square</b>	<b>F-value</b>	<b>p-value</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Adjusted R<sup>2</sup></b>
<b>Model</b>	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		
<b>Residual</b>	6038.35	8	754.79				
Lack of Fit	6036.07	4	1509.02	2641.74	0.1117		
Pure Error	2.28	4	0.5712				
<b>Cor Total</b>	16925.98	11					
<b>Linear</b>							
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

Figure 3- The results of predicted and experimental data for the rheological parameters of the studied models

جدول ۴- معناداری نتایج پیش‌بینی پارامترهای مدل‌های رئولوژیکی

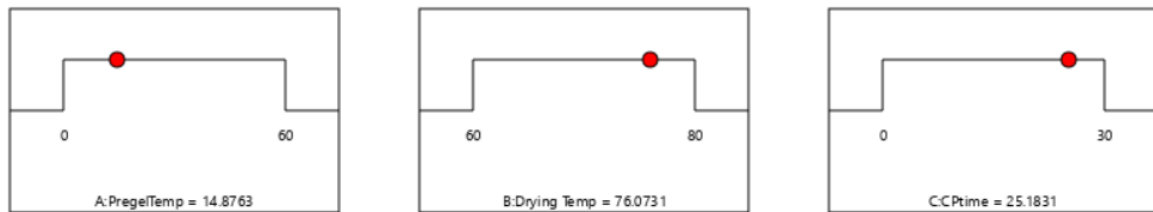
Table 4- The significance of the prediction results of the parameters of the rheological models

Model	R-squared	MAE	DF	Sig.
-------	-----------	-----	----	------

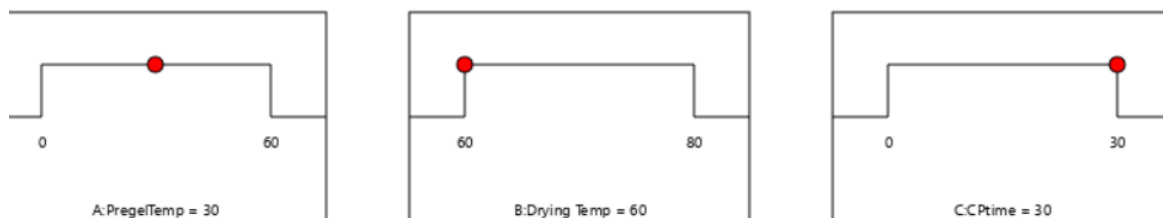
n.Power-Model_1	0.77	0.185	17	.047
k.Power-Model_2	0.68	0.221	17	.050
n.Casson-Model_3	0.55	0.388	17	.053
k.Casson-Model_4	0.45	0.27	18	.081
n.H.B-Model_5	0.89	0.238	17	.05
k.H.B-Model_6	0.93	0.283	17	.036

### ۳-۵- بهینه‌سازی عددی رفتار رئولوژیکی و ویسکوزیته نشاسته‌های تیمار شده

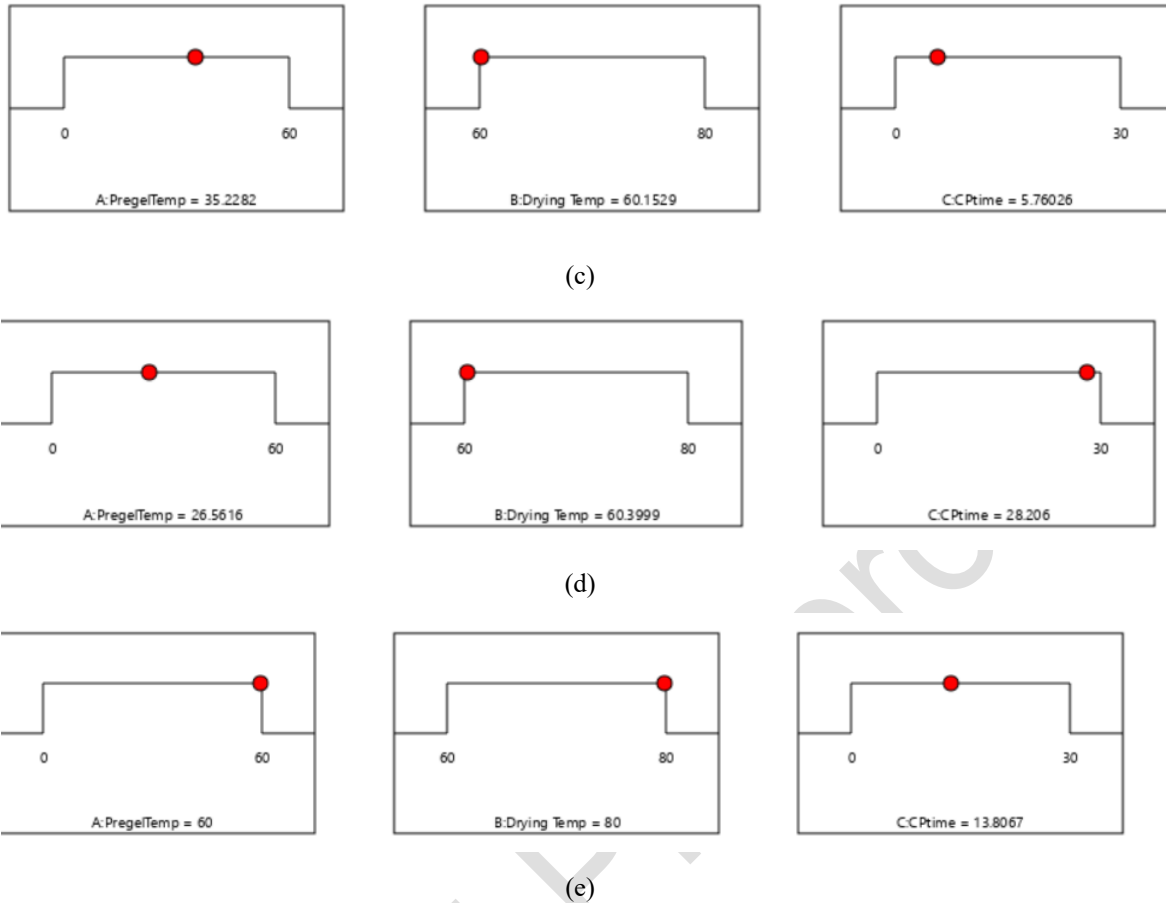
از آنجا که در این مطالعه مشخص شد هر کدام از شرایط مختلف می‌توانند رفتار رئولوژیکی متفاوتی از نیوتنی و غیر نیوتنی در دیسپرسیون ۲٪ نشاسته ایجاد کنند، یافتن شرایط تیمار برای مشخص شدن این رفتار چندگانه ضروری می‌نماید. لذا برای این کار مقدار اندیس جریان (n) قانون توان و ویسکوزیته مورد بهینه‌سازی قرار گرفتند. در بهینه‌سازی n، هدف تعیین شرایط مناسب برای ایجاد سه حالت رقیق شونده با برش، نیوتنی و غلیظ شونده با برش بود. برای بهینه‌سازی ویسکوزیته نیز با توجه به آنکه نشاسته در صنایع مختلف از نظر ویسکوزیته کاربردهای مختلفی خواهد داشت، هدف یافتن شرایط بهینه برای بیشترین و کمترین میزان ویسکوزیته بود. نتایج بهینه‌سازی عددی این پنج حالت در شکل ۴ نشان داده می‌شود.



(a)



(b)



شکل ۴- شرایط بهینه‌سازی اندیس  $n$  برای حالت رقیق شونده با برش (a) نیوتنی (b)، غلیظ شونده با برش (c)، بیشترین ویسکوزیته (d) و کمترین ویسکوزیته (e) در دیسپرسیون نشاسته اصلاح شده با تیمارهای مورد مطالعه

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

طبق این شکل، برای ایجاد حالت رقیق شونده با برش در نشاسته سیب‌زمینی، دمای پری-ژلاتینه نزدیک  $15^{\circ}\text{C}$ ، دمای خشک کردن  $76^{\circ}\text{C}$  و زمان تیمار با پلاسمای سرد حدود ۲۵ دقیقه لازم است. این شرایط برای ایجاد حالت نیوتنی به ترتیب عبارتند از  $30^{\circ}\text{C}$  و  $60^{\circ}\text{C}$  و ۳۰ دقیقه. برای ایجاد حالت غلیظ شونده با برش حدود  $35^{\circ}\text{C}$ ،  $60^{\circ}\text{C}$  و ۶ دقیقه. همچنین برای ایجاد بیشترین ویسکوزیته لازم است تا نمونه در دمای  $27^{\circ}\text{C}$  پری ژلاتینه شده و سپس به مدت حدود ۲۸ دقیقه تحت تیمار پلاسمای سرد قرار گرفته و بعد در دمای حدود  $60^{\circ}\text{C}$  خشک شود. این شرایط به ترتیب برای ایجاد کمترین ویسکوزیته در نشاسته اصلاح شده، به ترتیب عبارتند از  $60^{\circ}\text{C}$ ،  $80^{\circ}\text{C}$  و حدود ۱۴ دقیقه.

## ۴. نتیجه گیری

بررسی اثر تیمار پلاسمای سرد بر ویژگی‌های رئولوژیکی نشاسته سیب‌زمینی نشان دهنده تأثیر قابل توجه دما و زمان تیمار بر رفتار ویسکوزیته و ساختار مولکولی نشاسته است. نتایج به دست آمده تأکید می‌کنند که تیمار با پلاسمای سرد به ویژه دمایی کمتر از  $60^{\circ}\text{C}$  اثر معناداری بر کاهش پارامترهای رئولوژیکی نظیر ویسکوزیته و قوام نشاسته دارد. این تغییرات در ویژگی‌های رئولوژیکی، به دلیل 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 مشخص شد اصلاح نشاسته از طریق تیمار با پلاسمای سرد منجر به بهبود خواص عملکردی آن به ویژه آب‌دوستی و حلالیت می‌شود. علاوه بر این، اثر دما در فرآیندهای پیش ژلاتینه و خشک کردن، به وضوح مشاهده می‌شود و نشان دهنده اهمیت کنترل شرایط در به دست آوردن ساختاری بهینه برای نشاسته‌های تیمار شده است. شواهد حاصل از این مطالعه نه تنها درک بهتری از رفتار رئولوژیکی نشاسته به دست می‌دهد، بلکه راهکارهایی برای بهینه‌سازی فرآیندهای صنعتی مرتبط با تولید و کاربرد این نوع نشاسته را نیز فراهم می‌کند.

## تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

## منابع

- [1] Ai, Y., & Jane, J.-l. (2024). Understanding starch structure and functionality. In *Starch in food* (pp. 55-77): Elsevier.
- [2] 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 .
- [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] Bertuzzi, M. A., Armada, M., & Gottifredi, J. (2007). Physicochemical characterization of starch based films. *Journal of food engineering*, *82*(1), 17-25 .
- [5] 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 .
- [6] 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 .
- [7] 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 .
- [8] Compart, J., Singh, A., Fettke, J., & Apriyanto, A. (2023). Customizing starch properties: A review of starch modifications and their applications. *Polymers*, 15(16), 3491 .
- [9] 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 .
- [10] 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 .
- [11] 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 .
- [12] 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 .
- [13] Juszczak, L., Witczak, M., Ziêba, T., & Fortuna, T. (2012). Rheological behaviour of heated potato starch dispersions. *International Agrophysics*, 26 .(¿)
- [14] 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 .
- [15] 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 .
- [16] 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 .
- [17] Michel, J., Raffi, J., Saint-Lêbe, 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 .
- [18] 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 .

- [19] 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 .21.0.236 ,(2-3)
- [20] 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 .
- [21] Pankaj, S. K., Wan, Z., & Keener, K .M. (2018). Effects of cold plasma on food quality: A review. *Foods*, 7(1), 4 .
- [22] 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. doi:10.22101/jrifst.2023.378738.1422
- [23] 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. doi:<https://doi.org/10.1111/jfpe.14019>
- [24] Sabulase, V., Liuzzo, J., Rao, R., & Grodner, R. (1992). Physicochemical characteristics of brown rice as influenced by gamma irradiation. *Journal of Food Science* .1 20-1 23 ,(1)07 ,
- [25] Sarangapani, C., Devi, Y., Thirundas, R., Annapure, 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 .
- [26] 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 .
- [27]Szczeniak, A. S. (2002). Texture is a sensory property. *Food quality and preference*, 13(4), 215-225 .
- [28] Thirundas, R., Kadam, D., & Annapure, U. (2017). Cold plasma: An alternative technology for the starch modification. *Food biophysics*, 12, 129-139 .
- [29] 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 .
- [30] 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 .
- [31] Zhang, B., Chen, L., Li, X., Li, L., & Zhang, H. (2019) .Understanding the multi-scale structure and functional properties of starch modulated by glow-plasma: A structure-functionality relationship. *Food Hydrocolloids*, 50, 228-236 .

- [32] 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 .
- [32] 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 .
- [33] 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 .
- [34] Zou, J.-J., Liu, C.-J., & Eliasson, B. (2004). Modification of starch by glow discharge plasma. *Carbohydrate polymers*, 55(1), 23-26 .