

بررسی تغییرات رنگی بادمجان طی سرخ کردن

محیا شریعت علوی^۱، امان محمد ضیایی فر^{۲*}، سید مهدی کاشانی نژاد^۳، یحیی مقصودلو^۴، هدی شهیری^۵

مقاله پژوهشی

JSCW-2511-1267

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴-۰۸-۱۴

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۵-۰۲-۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵-۰۲-۱۴

خواهشمند است این مقاله به صورت زیر در مراجع قید شود:

م شریعت علوی، الف محمد ضیایی فر، م کاشانی نژاد، ی مقصودلو، ه شهیری "بررسی تغییرات رنگی بادمجان طی سرخ کردن

"، نشریه علمی مطالعات در دنیای رنگ JSCW-2511-1267 این فایل PDF مقاله ویرایش نشده است که برای چاپ پذیرفته شده است. ماکت مقاله توسط دفتر نشریه مطالعات در دنیای رنگ تهیه شده و قبل از چاپ ویرایش نهایی به نویسنده مسئول مقاله ارسال می شود.

بررسی تغییرات رنگی بادمجان طی سرخ کردن

محیا شریعت علوی^۱، امان محمد ضیایی فر^{۲*}، سید مهدی کاشانی نژاد^۲، یحیی مقصودلو^۲، هدی شهیری^۲

- ۱- دانشجوی دکتری، علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، دانشکده صنایع غذایی، کدپستی: ۴۹۱۳۸۱۵۷۳۹.
۲- استاد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، دانشکده صنایع غذایی، کدپستی: ۴۹۱۳۸۱۵۷۳۹.
۳- دانشیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، دانشکده صنایع غذایی، کد پستی: ۴۹۱۳۸۱۵۷۳۹.
* ziaiifar@gau.ac.ir

چکیده

رنگ یکی از مهم‌ترین شاخص‌های کیفیت حسی در صنایع غذایی بوده و نقشی اساسی در پذیرش مصرف‌کننده دارد. در این پژوهش، اثر اولئوژل موم کارنوبا-روغن کنجد به عنوان جایگزین روغن مایع بر تغییرات رنگی بادمجان طی سرخ کردن بررسی شد. بدین منظور، دو غلظت ۵ و ۱۰ درصد اولئوژل تهیه و نمونه‌ها در دماهای ۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و زمان‌های ۹۰ تا ۲۴۰ ثانیه سرخ شدند. تحلیل رنگ به کمک پردازش تصویر و پارامترهای L^* ، a^* و b^* صورت گرفت. نتایج نشان داد با افزایش دما و زمان، روشنایی کاهش و شاخص قرمزی افزایش یافت، در حالی که زردی ابتدا افزایش و سپس کاهش پیدا کرد. نمونه‌های سرخ شده با اولئوژل ۱۰ درصد، ثبات رنگی بیشتر و قهوه‌ای شدن کمتری نسبت به تیمار ۵ درصد و کنترل داشتند. این موضوع به ساختار شبکه‌ای موم و حضور آنتی‌اکسیدان‌های طبیعی روغن کنجد نسبت داده شد. در مجموع، اولئوژل کارنوبا-روغن کنجد، به ویژه در غلظت بالاتر، می‌تواند کیفیت رنگ و پایداری محصولات سرخ شده گیاهی را بهبود دهد.

واژه‌های کلیدی: رنگ، سرخ کردن، اولئوژل، موم کارنوبا، بادمجان. تغییر رنگ، پردازش تصویر.

Evaluation of Color Changes in Eggplant During Frying

Mahya Shariat Alavi¹, Aman Mohammad Ziaifar^{2*}, Mahdi Kashaninejad², Yahya Maghsoudlou², Hoda Shairi³

1- PhD Candidate, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources, Gorgan, Iran.

2- Professor, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources, Gorgan, Iran.

3- Associate Professor, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources, Gorgan, Iran.

* ziaifar@gau.ac.ir

Abstract

Color is a key sensory quality attribute influencing consumer acceptance of fried foods. This study investigated the effect of carnauba wax–sesame oil oleogel as a substitute for liquid oil on the color changes of eggplant during frying. Oleogels were prepared at concentrations of 5% and 10%, and eggplant samples were fried at 120, 150, and 180 °C for 90–240 s. Color parameters L* (lightness), a* (redness), and b* (yellowness) were evaluated using image processing techniques. Increasing frying temperature and time decreased lightness and increased redness, while yellowness showed an initial increase followed by a decrease. Samples fried in 10% oleogel showed reduced browning intensity and more limited color changes compared to 5% oleogel and control samples. These effects were attributed to the wax network structure and natural antioxidants in sesame oil. Overall, carnauba wax–sesame oil oleogel, particularly at higher concentrations, can improve color quality in fried plant-based products.

Keywords: Color, Frying, Oleogel, Carnauba wax, Eggplant, Color changes, Image processing.

رنگ از مهم‌ترین شاخص‌های کیفی در مواد غذایی است و نقش تعیین‌کننده‌ای در ادراک اولیه و پذیرش مصرف‌کننده دارد؛ به گونه‌ای که تغییرات رنگی می‌توانند حتی پیش از ارزیابی طعم و بافت، بر ترجیح مصرف‌کننده اثر بگذارند. در محصولات حرارتی، رنگ نه تنها جنبه حسی دارد بلکه شاخص مهمی از واکنش‌های قهوه‌ای شدن، کاراملیزاسیون^۱ و تخریب پیگمان‌ها بوده و بیانگر کیفیت فرآوری می‌باشد (۱). سرخ کردن یکی از روش‌های پرکاربرد در صنایع غذایی است که به دلیل ایجاد ویژگی‌های ادراکی مطلوب شامل طعم، بافت و رنگ جذاب، در میان مصرف‌کنندگان محبوب است. این فرآیند بر پایه انتقال حرارت و جرم میان روغن داغ، هوا و ماده غذایی انجام شده که منجر به تغییرات فیزیکوشیمیایی و ساختاری در سطح محصول می‌گردد (۲). با این حال، استفاده مستمر از روغن مایع در سرخ کردن مشکلاتی را به همراه دارد: جذب بالای روغن توسط ماده غذایی، افزایش ترکیبات ناخواسته در روغن مثل محصولات اکسیداسیون^۲ و ترکیبات قطبی ثانویه، تغییرات ناخواسته در رنگ و ظاهر محصولات سرخ شده (قهوه‌ای شدن بیش از حد، کاهش روشنایی) (۳). در سال‌های اخیر، مفهوم اولئوژل^۳ به عنوان یک جایگزین فناوری برای روغن مایع مطرح شده است. اولئوژل‌ها سیستم‌هایی ساختاریافته‌اند که در آن‌ها روغن مایع با کمک عواملی ساختاری (مثل موم‌های گیاهی) در شبکه‌ای ژلی پایه‌گذاری شده و به شکل نیمه جامد درمی‌آیند. این ساختار می‌تواند روغن را به طور مؤثرتری در خود محبوس نموده و پایداری حرارتی و اکسیداتیو را در فرآیند سرخ کردن ارتقاء بخشد (۴). موم کارنوبا به عنوان یکی از موم‌های طبیعی پرکاربرد در صنایع غذایی، به دلیل نقطه ذوب بالا، ساختار بلوری منظم و توانایی مناسب در تشکیل شبکه‌های ژلی پایدار، در تولید اولئوژل‌ها مورد توجه قرار گرفته است. این ویژگی‌ها موجب پایداری ساختار اولئوژل در شرایط حرارتی فرآیندهایی نظیر سرخ کردن می‌شود. علاوه بر این، موم کارنوبا^۴ به دلیل منشأ طبیعی و داشتن تأییدیه‌ی مصرف در کاربردهای غذایی، گزینه‌ای مناسب برای توسعه سیستم‌های جایگزین روغن‌های متداول محسوب می‌شود (۴).

مطالعات متعددی نقش مثبت اولئوژل‌ها را در کاهش جذب روغن و افزایش پایداری نشان داده‌اند؛ به طور مثال، استفاده از اولئوژل‌های بر پایه موم سبوس برنج و روغن شاهدانه در سرخ کردن ماهی منجر به کاهش میزان ترکیبات قطبی، مقدار پراکسید و اسیدهای چرب ترانس شد (۳). همچنین کاربرد موم سویا و روغن آفتابگردان در تهیه دونات نشان داد که نمونه‌های سرخ شده در اولئوژل، روشنایی بیشتر (L^* بالاتر) و قرمزی (a^*) کمتر ولی کیفیت ظاهری (منظور از کیفیت ظاهری، ویژگی‌های قابل مشاهده محصول سرخ شده شامل رنگ، شکل و یکنواختی سطح) بهتری داشته و همزمان جذب چربی کمتر بود (۵). در پژوهشی دیگر نتایج حاکی از آن بود که اولئوژل‌ها (عمدتاً بر پایه‌ی موم‌ها یا اتیل سلولز) علاوه بر کاهش جذب چربی و بهبود پایداری اکسیداتیو، می‌توانند پروفایل رنگ محصول سرخ شده را نیز تحت تأثیر قرار دهند؛ هرچند جهت و شدت اثر به نوع اولئوژلاتور، غلظت، روغن پایه و ماتریس غذایی وابسته است (۶). در این میان، رنگ به عنوان یک ویژگی ظاهری بسیار اثرگذار بر پذیرش مصرف‌کننده، اهمیت ویژه‌ای دارد. پارامترهای رنگ شامل L^* (روشنایی)، a^* (قرمزی/سبزی) b^* (زردی/آبی) می‌باشند که تغییرات آن‌ها در اثر حرارت‌دهی قابل اندازه‌گیری هستند. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از پوشش‌هایی مانند ژل آلئوئور برای حلقه‌های بادمجان، علاوه بر کاهش جذب روغن، باعث افزایش روشنایی (L^*) و کاهش قرمزی نسبت به نمونه‌ی کنترل شد (به خصوص در غلظت‌های ۵۰ درصد و در دمای سرخ کردن بالای 180°C) (۱). چوهان و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کردند، نمونه‌های سرخ شده‌ی میان وعده سنتی^۵ در اولئوژل موم کارنوبا-روغن سویا، رطوبت‌پذیری و رنگ بهتری نسبت به روغن سویا داشتند (۷). در مطالعه‌ی دیگر داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد نمونه‌های سیب‌زمینی سرخ شده در اولئوژل روشن‌تر از نمونه‌های سرخ شده در روغن معمولی بودند (L بالاتر). تحلیل پژوهشگران، نقش دما، زمان و واکنش‌های میلارد را در تغییرات a^* و b^* توضیح می‌دهد (۸).

بادمجان (*Solanum melongena*, L.) در نقاط گرمسیری و معتدل جهان رشد می‌کند و به عنوان یکی از صیفی‌جات مهم بازار کشورهای آسیایی و مدیترانه‌ای مطرح است. ایران بعد از چین و هند، مقام سوم تولید بادمجان در جهان را دارد. سرخ کردن یکی از روش‌های فرآوری این محصول می‌باشد و بادمجان سرخ شده بر اساس سلیقه‌ی مردم مناطق مختلف، تهیه و مصرف می‌شود (۹-۱۰). تغییرات فیزیکی و شیمیایی مختلفی مانند تغییرات رنگ سطح (قهوه‌ای شدن)، خروج سریع آب و جذب روغن در طی فرایند سرخ کردن رخ می‌دهد (۱۱). بادمجان به دلیل ساختار متخلخل و میزان جذب بالای روغن، یک مدل کاربردی برای بررسی این پدیده‌ها محسوب

¹ Caramelization

² Oxidation

³ Oleogel

⁴ Carnauba Wax

⁵ Mathari

⁶ Eggplant

می‌شود. افزون بر این، تغییر ظاهر رنگ در سطح سرخ‌شده آن (به‌خصوص قهوه‌ای شدن یا تیره شدن بیش‌ازحد) می‌تواند کیفیت ظاهری و پذیرش ادراکی محصول را تحت تأثیر قرار دهد. با توجه به اهمیت ترکیب این چهار موضوع، (فرآیند سرخ‌کردن، اولئوژل به‌عنوان محیط سرخ‌کردن، رنگ به‌عنوان شاخص کیفیت ظاهری و بادمجان به‌عنوان نمونه مطالعاتی) هدف اصلی این پژوهش، بررسی تأثیر استفاده از اولئوژل به‌جای روغن مایع در سرخ‌کردن بر تغییرات رنگ (b^* , a^* , L^*) بادمجان است. نوآوری این پژوهش در بررسی کاربرد اولئوژل حاوی موم کارنوبا در فرآیند سرخ‌کردن بادمجان نهفته است. این مطالعه، ضمن ارزیابی اثرات اولئوژل بر کیفیت محصول و پایداری حرارتی، به ارائه جایگزینی سالم‌تر برای روغن‌های متداول کمک می‌کند و اطلاعات جدیدی در زمینه توسعه سیستم‌های سرخ‌کردن با استفاده از اولئوژل‌ها فراهم می‌آورد.

۲- بخش تجربی

۲-۱- تهیه مواد اولیه

بادمجان از بازار محلی واقع در شهرستان گرگان خریداری شد و در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد تا شروع انجام آزمایش‌ها نگهداری شد. روغن کنجد^۱ تصفیه شده یک لیتری، از فروشگاه روغن گیری کامجد (گرگان، ایران)، به‌عنوان ماده اولیه جهت تولید اولئوژل استفاده شد. موم‌های طبیعی و دیگر مواد شیمیایی استفاده‌شده در این تحقیق با درصد خلوص بالا از شرکت مرک تهیه شد.

۲-۲- آماده سازی اولئوژل‌ها

موم کارنوبا در دو غلظت ۵ و ۱۰ درصد وزنی/وزنی به روغن کنجد اضافه شد و مخلوط حاصل به مدت ۶۰ دقیقه در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد تحت حرارت قرار گرفت تا ذوب کامل انجام شود. فرآیند همزدن با سرعت ۵۰۰ دور بر دقیقه به‌صورت یکنواخت انجام شد. سپس به منظور تشکیل ساختار اولئوژل، مخلوط حاصله تا رسیدن به دمای اتاق توسط آب سرد خنک شد. در نهایت، نمونه‌ها در مدت زمان ۲۴ ساعت و دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد و یک ساعت قبل از استفاده در دمای اتاق قرار گرفت (۱۲). غلظت‌های ۵ درصد و ۱۰ درصد اولئوژل بر اساس گزارش‌های موجود در مطالعات پیشین و با هدف بررسی اثر سطوح پایین و بالاتر عامل ژل‌کننده بر ویژگی‌های سرخ‌کردن انتخاب شدند. این بازه غلظتی امکان ارزیابی تشکیل ساختار ژلی پایدار و اثر آن بر جذب روغن و کیفیت محصول نهایی را فراهم می‌کند.

۲-۳- آماده سازی ماده اولیه (بادمجان)

بادمجان پس از شستشو به صورت ورقه‌های دایره‌ای با ابعاد قطر ۴/۸ سانتی‌متر و ضخامت ۱ سانتی‌متر با استفاده از قالب دستی (جهت حصول حلقه‌های یکسان) برش داده شد.

۲-۴- فرآیند سرخ کردن عمیق

عملیات سرخ کردن عمیق طبق روش لیم و همکاران (۲۰۱۷) با کمی تغییرات در یک مینی سرخ‌کن تجاری (ویداس، vidas مدل VI-5712 ساخت کشور ایران) انجام گرفت. ابتدا ۰/۵ لیتر اولئوژل در داخل سرخ‌کن ریخته شد و بعد از تنظیم دمای محیط سرخ‌کن با استفاده از یک ترموکنترلر در دماهای ۱۲۰، ۱۵۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد قطعات بادمجان در داخل اولئوژل به مدت زمان‌های ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰، ۱۸۰، ۲۱۰ و ۲۴۰ ثانیه سرخ گردید. بعد از گذشت مدت زمان مربوطه نمونه‌ها از روغن خارج شده و سپس در دمای اتاق به مدت ۱ ساعت خنک شدند (۱۲). نمونه شاهد شامل برش‌های بادمجان سرخ‌شده در روغن مایع کنجد بوده که تحت دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت زمان‌های ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰، ۱۸۰، ۲۱۰ و ۲۴۰ ثانیه سرخ گردید. برای نمونه شاهد، دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد به‌عنوان دمای مرجع انتخاب شد. این دما نماینده میانگین دماهای بررسی‌شده بود و با هدف کاهش تعداد تیمارها و ساده‌سازی مقایسه بین نمونه شاهد و تیمارهای اولئوژل به‌کار گرفته شد.

۲-۵- اندازه‌گیری رنگ

برای بررسی تغییرات رنگ سطح بادمجان‌های سرخ‌شده در روغن یا اولئوژل، از روش پردازش تصویر استفاده شد. تصاویر نمونه‌ها با اسکنر مسطح HP Sanjet G2710 ساخت کشور آمریکا) ثبت و در قالب JPG ذخیره گردیدند و سپس با استفاده از نرم‌افزار Image J به فضای رنگی CIELAB (L^* , a^* , b^*) تبدیل شدند تا تحلیل دقیق پارامترهای رنگ امکان‌پذیر باشد. در این مدل

¹ Sesame Oil

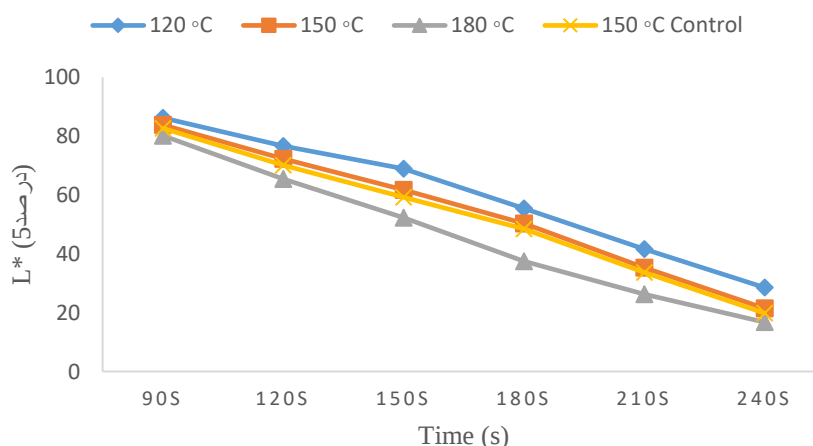
رنگی، L^* نمایانگر روشنایی نمونه (۰ = سیاه، ۱۰۰ = سفید)، a^* نشان‌دهنده قرمزی/سبزی (۱۲۰- تا ۱۲۰+) و b^* نشان‌دهنده زردی/آبی (۱۲۰- تا ۱۲۰+) است (۱۳). مقادیر L^* ، b^* و a^* برای هر نمونه استخراج و میانگین آن‌ها محاسبه شد. کلیه آزمایش‌ها برای هر تیمار در سه تکرار مستقل انجام گرفت. برای رسم نمودارها از برنامه اکسل ۲۰۱۶ و برای تجزیه و تحلیل آماری از نرم افزار SAS 9.1 در سطح معنی داری ۵ درصد استفاده گردید.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- شاخص روشنایی (L^*) در نمونه‌های سرخ‌شده با اولئوژل ۵ درصد

نتایج حاصل از اندازه‌گیری شاخص روشنایی (L^*) در نمونه‌های بادمجان سرخ‌شده با اولئوژل حاوی ۵ درصد موم کارنوبا در دماهای مختلف (۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد) (شکل ۱) نشان داد که مقدار L^* در تمامی تیمارها با افزایش زمان سرخ‌کردن کاهش معنی‌داری داشت ($P < 0.05$). این روند کاهشی بیانگر تیره‌تر شدن تدریجی سطح نمونه‌ها در اثر پیشرفت واکنش‌های قهوه‌ای شدن و کاراملیزاسیون طی فرایند سرخ‌کردن است. در بین دماهای مورد بررسی، بیشترین کاهش مقدار L^* در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد، در حالی که در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد کاهش روشنایی با شیب ملایم‌تری صورت گرفت. به عبارت دیگر، افزایش دمای روغن منجر به تسریع واکنش‌های قهوه‌ای شدن غیرآنزیمی (واکنش مایلارد و کاراملیزاسیون قندهای احیاء‌کننده) و در نتیجه تیره‌تر شدن سریع‌تر رنگ سطح بادمجان گردید (۱۴).

مقایسه بین نمونه‌های سرخ‌شده در اولئوژل و نمونه کنترل (سرخ‌شده در روغن مایع در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد) نشان داد که در تمام بازه‌های زمانی، مقدار L^* در نمونه‌های اولئوژل ۵ درصد به طور ثابت بالاتر از کنترل باقی ماند و تغییرات بین تیمارها از نظر آماری معنی‌دار بودند ($P < 0.05$). این امر نشان‌دهنده توانایی بالاتر سیستم اولئوژل در حفظ روشنایی و جلوگیری از تیره‌شدن بیش از حد سطح است. تفاوت بین دو تیمار در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد در طول فرایند حدود ۱ تا ۲/۵ واحد L^* بود، که اگرچه مقدار این تغییر از نظر عددی پایین‌تر از سایر تیمارها گزارش شد، اما در ارزیابی چشمی محصول، قابل توجه است. چنین رفتاری احتمالاً ناشی از ویژگی‌های ساختاری اولئوژل است که به‌عنوان یک شبکه مومی نیمه‌جامد مطابق با گزارش‌های پیشین، نفوذ روغن آزاد و انتقال حرارت را تعدیل کرده و در نتیجه از تماس مستقیم و سریع روغن داغ با بافت بادمجان می‌کاهد (۱۵). به علاوه، حضور موم کارنوبا سبب افزایش ویسکوزیته و پایداری حرارتی سیستم می‌شود و از تخریب سریع رنگدانه‌ها جلوگیری می‌کند (۱۶). در واقع، روغن کنجد به دلیل داشتن ترکیبات ضداکسیدانی طبیعی مانند توکوفرول‌ها و لیگنان‌ها، می‌تواند به حفظ رنگ مطلوب کمک کند و از اکسیداسیون رنگدانه‌های سطحی جلوگیری نماید. این ترکیبات آنتی‌اکسیدانی در کنار محدودیت انتقال جرم در ساختار اولئوژل، می‌توانند از تخریب پیگمنت‌های طبیعی و تیره شدن سریع سطح بادمجان جلوگیری کنند (۱۷). نتایج حاضر با یافته‌های گزارش‌شده درباره استفاده از اولئوژل‌های مومی در سرخ‌کردن محصولات گیاهی همخوانی دارد؛ به‌گونه‌ای که پژوهش‌ها نشان داده‌اند حضور این ساختارها می‌تواند منجر به کاهش نرخ قهوه‌ای شدن و محدود شدن تغییرات رنگ ظاهری در طول فرایند سرخ‌کردن شود. (۱۸-۱۹).

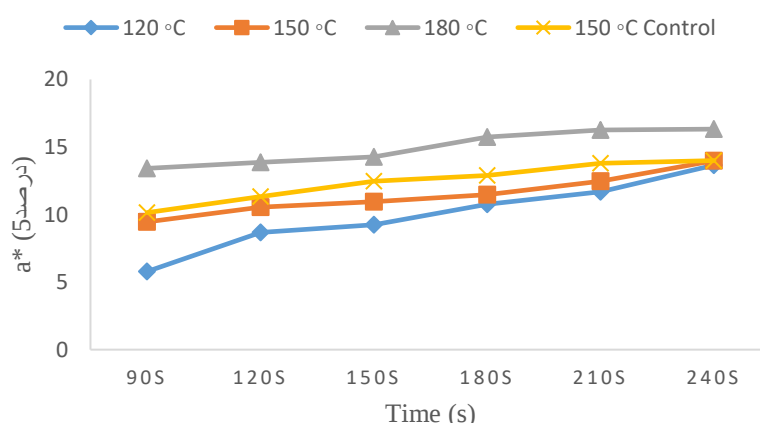


شکل ۱: بررسی تغییرات شاخص روشنایی (L^*) بادمجان در دماهای مختلف سرخ‌کردن در غلظت ۵ درصد.
Figure 1: Effect of temperature on lightness parameter (L^*) during frying of eggplant at a concentration 5%.

۳-۲- شاخص قرمزی (a^*) در نمونه‌های سرخ‌شده با اولئوژل ۵ درصد

مقاله پذیرفته شده

نتایج به دست آمده از اندازه گیری شاخص a^* در نمونه های بادمجان سرخ شده در اولئوژل ۵ درصد (موم کارنوبا و روغن کنجد) (شکل ۲) نشان داد که در تمامی دماهای مورد بررسی (۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ درجه سانتی گراد) مقدار a^* با افزایش زمان سرخ کردن از ۹۰ تا ۲۴۰ ثانیه روندی افزایشی و یکنواخت داشت. از نظر آماری تغییر دما اثر معنی داری بر تغییر شاخص قرمزی بادمجان های سرخ شده داشت ($P < 0.05$). این افزایش بیانگر تشدید فرآیندهای قهوه ای شدن غیر آنزیمی از جمله واکنش میلارد و کاراملیزاسیون است که با گذشت زمان و افزایش دما شدت می یابند و منجر به تشکیل رنگدانه های قهوه ای مایل به قرمز در سطح نمونه می شوند (۲۰). در میان دماهای مختلف، بیشترین مقدار a^* در تمام زمان ها در دمای ۱۸۰ درجه سانتی گراد مشاهده شد، که نشان دهنده تشدید واکنش های تولید رنگ در دمای بالا است. در مقابل، کمترین تغییرات مربوط به دمای ۱۲۰ درجه سانتی گراد بود، جایی که واکنش های میلارد با نرخ کمتری انجام می گیرند. در مقایسه با نمونه ی کنترل (روغن مایع در ۱۵۰ درجه سانتی گراد)، مقادیر a^* در اولئوژل تفاوت زیادی نشان ندادند و در اغلب زمان ها کمی پایین تر یا نزدیک به کنترل بودند. این موضوع بیانگر آن است که حضور ساختار ژلی در روغن، ضمن حفظ ویژگی های سرخ کردن، توانسته است تا حدودی از پیشرفت سریع قهوه ای شدن سطحی جلوگیری کند (۲۱). به طور کلی، افزایش a^* در محصولات سرخ شده با دما و زمان، روندی شناخته شده است که به واکنش های میلارد بین قندهای احیا کننده و ترکیبات آمینه و نیز تخریب رنگدانه های طبیعی مربوط می شود (۲۰). در این پژوهش، در نمونه های سرخ شده با اولئوژل، شیب افزایش a^* در مراحل اولیه کندتر از کنترل بود که می تواند به دلیل نقش شبکه ی ژلی موم کارنوبا در کاهش انتقال حرارت و نفوذ روغن آزاد به سطح نمونه باشد که پیش تر در مطالعات دیگر گزارش شده است (۲۲-۲۳). این ساختار ژلی با افزایش ویسکوزیته محیط سرخ کردن، نرخ تبخیر رطوبت و تشکیل پوسته را تعدیل کرده و در نتیجه باعث کاهش نرخ اولیه ی قهوه ای شدن می شود. از سوی دیگر، ترکیب روغن کنجد در ساختار اولئوژل حاوی آنتی اکسیدان های طبیعی مانند توکوفرول ها و لیگنان ها است که می توانند از پیشرفت اکسیداسیون لیپیدها و در نتیجه از تولید ترکیبات رنگ زا در مراحل نهایی فرایند جلوگیری کنند (۲۴-۲۵). بنابراین، می توان نتیجه گرفت که افزایش قرمزی در نمونه های اولئوژل شده در مقایسه با کنترل نه تنها تابع دما و زمان، بلکه تحت تأثیر ترکیبات فعال و ساختار فیزیکی سیستم روغنی نیز بوده است. به طور خلاصه، تغییرات شاخص a^* در بادمجان سرخ شده در اولئوژل ۵ درصد نشان داد که دمای بالاتر موجب افزایش سریع تر قرمزی شد، در حالی که حضور ساختار ژلی و ترکیبات ضد اکسیدانی در روغن کنجد باعث کند شدن روند اولیه افزایش قرمزی و حفظ رنگ مطلوب تر نسبت به کنترل گردید. یافته های مشابهی نیز در مطالعات مربوط به سرخ کردن با اولئوژل های بر پایه ی موم های گیاهی در محصولات دیگر از جمله سیب زمینی و دونات گزارش شده است (۲۶-۲۷).

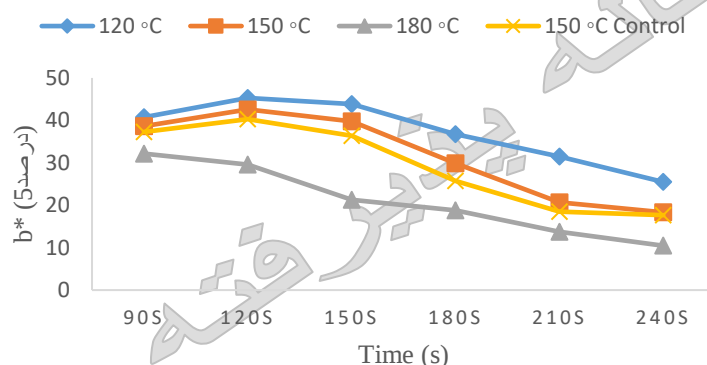


شکل ۲: بررسی تغییرات شاخص روشنایی (a^*) بادمجان در دماهای مختلف سرخ کردن در غلظت ۵ درصد.
Figure 2: Effect of temperature on lightness parameter (a^*) during frying of eggplant at a concentration 5%.

۳-۳- شاخص زردی (b^*) در غلظت ۵ درصد

بر اساس داده های نمودار مربوط به شاخص b^* (شکل ۳)، مقدار زردی سطح بادمجان در تمام تیمارها در ابتدا بالا بوده و با افزایش زمان سرخ کردن کاهش یافته است. در دمای ۱۲۰ درجه سانتی گراد مقدار b^* از ۴۰/۷۵۶ به ۲۵/۴۷۸ در ۲۴۰ ثانیه رسید، در حالی که در دمای ۱۸۰ درجه این کاهش شدیدتر بود و از ۳۲/۱۵۷ به ۱۰/۴۵۲ تغییر یافت ($P < 0.05$). این

روند نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه افزایش دما و زمان بر تجزیه رنگدانه‌های طبیعی بادمجان و واکنش‌های قهوه‌ای شدن (به‌ویژه واکنش میلارد و کاراملیزاسیون) است. نتایج مشابهی در پژوهش‌هایی روی چیپس سیب‌زمینی گزارش شده است که افزایش دما باعث تسریع واکنش‌های قهوه‌ای و افت مؤلفه‌ی زردی می‌شود (۲۸). در مقایسه با نمونه کنترل (که در دمای ۱۵۰ درجه سرخ شده بود)، تیمارهای اولئوژل ۵ درصد در دماهای پایین‌تر (۱۲۰ درجه) توانستند مقدار b^* بالاتری حفظ کنند، به‌طوری‌که در بیشتر زمان‌ها زردی سطح بادمجان بالاتر از کنترل باقی ماند. این امر می‌تواند به نقش حفاظتی ترکیبات آنتی‌اکسیدانی موجود در روغن کنجد نسبت داده شود که با مهار واکنش‌های اکسیداسیون رنگدانه‌ها، شدت تغییرات رنگ ظاهری در مؤلفه زردی را کاهش می‌دهند (۲۹-۳۰). در مقابل، در دمای بالاتر (۱۸۰ درجه) افت سریع مقدار b^* احتمالاً به دلیل تسریع تخریب رنگدانه‌های کاروتنوئیدی و واکنش‌های قهوه‌ای غیرآنزیمی بوده است. در واقع، استفاده از اولئوژل موم کارنوبا در ساختار روغن کنجد باعث افزایش ویسکوزیته محیط سرخ کردن و کاهش انتقال جرم اکسیژن شده، که می‌تواند تا حدودی از تغییرات ظاهری رنگ جلوگیری کند. یافته‌های مشابه توسط Marangoni و همکاران (۲۰۱۸) و Patel و همکاران (۲۰۱۴) گزارش شده است که ساختارهای اولئوژلی مبتنی بر موم گیاهی، پایداری رنگی بهتری در فرایندهای حرارتی ایجاد می‌کنند. در نتیجه، می‌توان نتیجه گرفت که در غلظت ۵ درصد، سیستم اولئوژلی توانسته تا حدودی زردی طبیعی بادمجان را در دماهای پایین‌تر حفظ کند، اما در دماهای بالا این اثر کاهش یافته است (۱۵،۳۱).

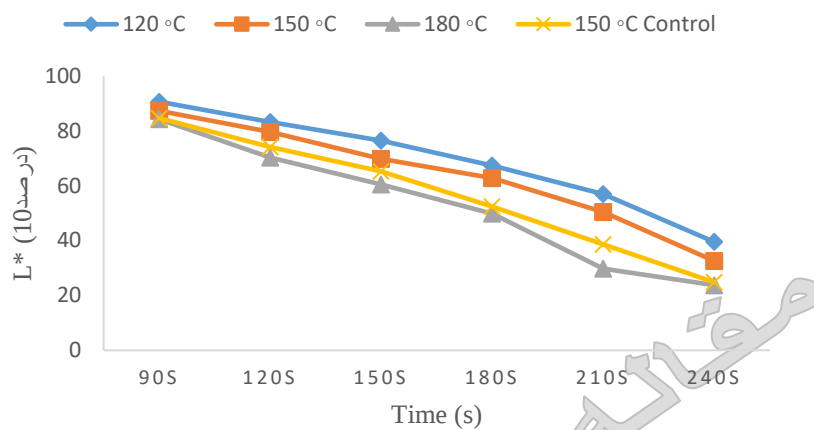


شکل ۳: بررسی تغییرات شاخص روشنایی (b^*) بادمجان در دماهای مختلف سرخ کردن در غلظت ۵ درصد.
Figure 3: Effect of temperature on lightness parameter (b^*) during frying of eggplant at a concentration 5%.

۳-۴- شاخص روشنایی (L^*) در غلظت ۱۰ درصد

بر اساس داده‌های نمودار مربوط به شاخص L^* (شکل ۴)، مقدار روشنایی بادمجان در تمامی دماها با افزایش زمان سرخ کردن کاهش یافت. در دمای ۱۲۰ درجه، مقدار L^* از ۹۰/۶۵۲ تا ۹۰/۹۰ ثانیه به ۳۹/۵۲۹ در ۲۴۰ ثانیه رسید، در حالی که در دمای ۱۸۰ درجه این مقدار از ۸۴/۲۵۷ به ۲۳/۷۴۶ کاهش پیدا کرد. همان‌طور که در نمودار اثر تغییر دما بر شاخص روشنایی مشاهده می‌شود، از نظر آماری در دماهای مختلف تا زمان ۱۸۰ ثانیه اختلاف معناداری وجود ندارد اما در زمان ۱۸۰ ثانیه به بعد اختلاف معنی‌داری دارند. اما روند کاهش L^* با افزایش دما شدت بیشتری داشت و در دمای بالاتر، نمونه‌ها رنگ تیره‌تری به خود گرفتند. این تغییر به‌طور عمده ناشی از واکنش‌های میلارد، کاراملیزاسیون قندها و اکسیداسیون رنگدانه‌های طبیعی بادمجان در طول حرارت‌دهی است. یامساگسنگ^۱ و همکاران گزارش کردند که افزایش دمای سرخ کردن موجب تشدید واکنش‌های قهوه‌ای شدن و کاهش سریع‌تر شاخص روشنایی در مواد غذایی می‌شود (۳۲). در مقایسه بین دماها، در زمان‌های اولیه سرخ کردن (۹۰ تا ۱۵۰ ثانیه)، تفاوت بین دمای ۱۲۰ و ۱۵۰ درجه چندان زیاد نیست، اما در دماهای بالا (۱۸۰ درجه) کاهش L^* بسیار شدیدتر و سریع‌تر رخ داده است. این مسئله نشان‌دهنده اثر غالب دما نسبت به زمان در تیره شدن سطح نمونه‌هاست. مطالعات مشابه پدرچی^۲ و همکاران (۲۰۰۶) در سیب‌زمینی و Chen و همکاران (۲۰۲۴) در چیپس قارچ شیتاکه نیز تأیید کرده‌اند که افزایش دما موجب افزایش نفوذ حرارت، کاهش رطوبت سطحی و در نتیجه افزایش شدت قهوه‌ای شدن می‌شود (۳۳-۳۴). از سوی دیگر، مقادیر L^* در تیمارهای اولئوژل ۱۰ درصد در بیشتر زمان‌ها از نمونه کنترل (در دمای ۱۵۰ درجه)

بالتر بوده است، به‌ویژه در دماهای پایین‌تر (۱۲۰ درجه)، که نشان‌دهنده تأثیر محافظتی اولئوژل در کاهش شدت قهوه‌ای شدن است. ساختار شبکه‌ای اولئوژل موم کارنوبا با افزایش ویسکوزیته و محدود کردن انتقال اکسیژن، باعث کاهش اکسیداسیون رنگدانه‌ها و کنترل واکنش‌های میلارد می‌شود (۱۴، ۳۰). در نتیجه، می‌توان گفت که استفاده از اولئوژل با غلظت ۱۰ درصد موجب پایداری بهتر روشنایی در دماهای پایین‌تر می‌شود، در حالی که در دماهای بالا، با وجود اثر حفاظتی نسبی، شدت قهوه‌ای شدن همچنان افزایش می‌یابد. این رفتار حاکی از آن است که نقش حفاظتی اولئوژل در برابر تغییر ظاهر رنگ، بیشتر در محدوده‌ی حرارتی ملایم مؤثر است.



شکل ۴: بررسی تغییرات شاخص روشنایی (L^*) بادمجان در دماهای مختلف سرخ کردن در غلظت ۱۰ درصد.
Figure 4: Effect of temperature on lightness parameter (L^*) during frying of eggplant at a concentration 10%.

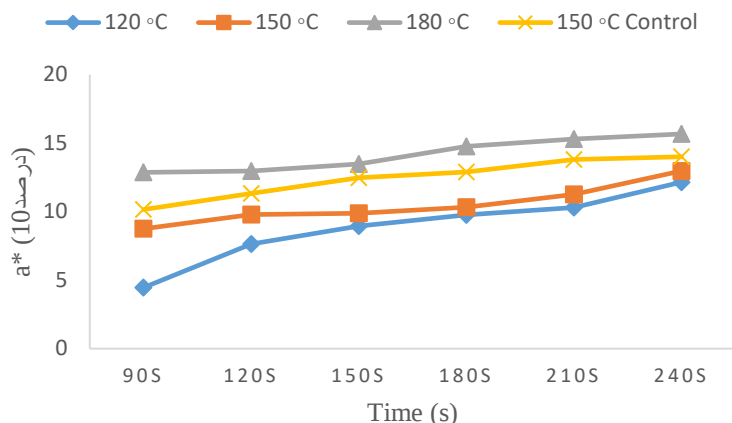
۳-۵- مقایسه‌ی شاخص L^* بین دو غلظت اولئوژل

مقایسه‌ی نتایج نشان داد که کاهش روشنایی (L^*) در نمونه‌های حاوی اولئوژل ۱۰ درصد کندتر از نمونه‌های ۵ درصد بود. به عبارت دیگر، در تمام دماها بادمجان‌های سرخ‌شده با اولئوژل غلیظ‌تر رنگ روشن‌تری حفظ کردند. این تفاوت می‌تواند به دلیل ساختار متراکم‌تر شبکه‌ی موم کارنوبا در غلظت بالاتر باشد که انتقال اکسیژن و نفوذ روغن به بافت را محدود می‌کند و در نتیجه واکنش‌های قهوه‌ای شدن را کاهش می‌دهد. نتایج مشابهی توسط Ankaraligil و همکاران (۲۰۲۴)، و Thakur و همکاران (۲۰۲۳) گزارش شده است که افزایش غلظت موم در سیستم‌های اولئوژلی، پایداری رنگ و روشنایی را در طی حرارت‌دهی افزایش می‌دهد (۳۵-۳۶). در مجموع، می‌توان نتیجه گرفت که غلظت بالاتر اولئوژل (۱۰ درصد) نسبت به غلظت پایین‌تر (۵ درصد) نقش مؤثرتری در حفظ روشنایی سطح بادمجان در فرآیند سرخ کردن داشته است، به‌ویژه در دماهای پایین‌تر از ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد.

۳-۶- شاخص قرمزی (a^*) در غلظت ۱۰ درصد

در شکل ۵، اثر دمای سرخ کردن بر تغییر شاخص قرمزی (a^*) طی سرخ کردن بادمجان نمایش داده شده است. همانطور که قابل ملاحظه است در نمونه‌های سرخ‌شده با اولئوژل ۱۰ درصد، شاخص a^* (قرمزی) با افزایش زمان و دمای سرخ کردن افزایش یافت ($P < 0.05$), که بیانگر پیشرفت واکنش‌های میلارد و کاراملیزاسیون در سطح بادمجان است. با این حال، شدت این افزایش نسبت به روغن معمولی یا نمونه کنترل کمتر بود، که می‌تواند ناشی از پایداری حرارتی بالاتر و کاهش نرخ اکسیداسیون چربی‌ها در حضور ماتریس مومی متراکم‌تر باشد. این ساختار ژل مانند، تبخیر رطوبت و انتقال اکسیژن را محدود کرده و از تشکیل رنگ‌های تیره جلوگیری می‌کند (۳۷). همچنین، افزایش غلظت موم کارنوبا موجب ایجاد شبکه‌ای منسجم‌تر در اولئوژل و در نتیجه پخش حرارت یکنواخت‌تر و واکنش‌های رنگی کنترل‌شده‌تر می‌شود، که در مطالعات Ankaraligil & Aydeniz-Guneser (۲۰۲۴) نیز گزارش شده است (۳۵).

مقاله پذیرفته شده



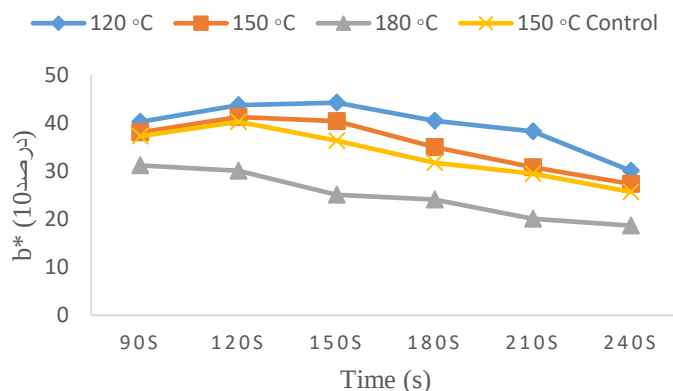
شکل ۵: بررسی تغییرات شاخص روشنایی (a^*) بادمجان در دماهای مختلف سرخ کردن در غلظت ۱۰ درصد.
Figure 5: Effect of temperature on lightness parameter (a^*) during frying of eggplant at a concentration 10%.

۷-۳- مقایسه‌ی شاخص a^* بین دو غلظت اولئوژل

در هر دو غلظت، مقدار a^* با افزایش دما و زمان سرخ کردن افزایش یافت که نشان‌دهنده‌ی تقویت رنگ قرمز ناشی از واکنش میلارد است. با این حال، در غلظت ۱۰ درصد شدت قرمزی بیشتر بود؛ به‌ویژه در دمای 180°C ، که می‌تواند ناشی از پایداری اکسیداتیو بالاتر و کاهش نفوذ اکسیژن در ساختار متراکم‌تر اولئوژل باشد. بنابراین، افزایش مقدار موم از ۵ درصد به ۱۰ درصد، سبب بهبود یکنواختی رنگ و حفظ رنگ‌دانه‌ها و قرمزی بیشتر ولی کنترل‌شده‌تر در سطح بادمجان گردیده و ظاهری مطلوب‌تر نسبت به کنترل ایجاد کرده است.

۸-۳- شاخص زردی (b^*) در غلظت ۱۰ درصد

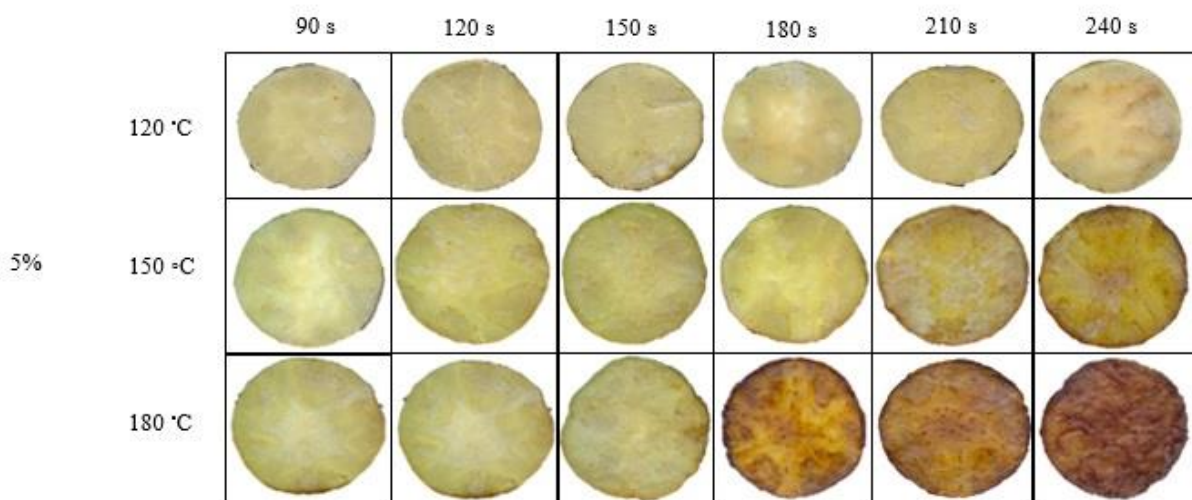
شکل ۶ تغییرات پارامتر زردی (b^*) رنگ سطح برش‌های بادمجان را در دماهای مختلف سرخ کردن نشان می‌دهد. در نتایج به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری شاخص b^* ، مشاهده شد که در هر غلظت ۱۰ درصد اولئوژل موم کارنوب-روغن کجند، مقدار b^* در زمان‌های ابتدایی سرخ کردن (۹۰ تا ۱۵۰ ثانیه) افزایش یافت. این افزایش به دلیل تشکیل پیگمنت‌های زردرنگ در مراحل اولیه واکنش میلارد و تجمع ترکیبات کربونیل حاصل از قندهای احیاکننده و آمین‌ها است (۳۸). با ادامه‌ی فرآیند سرخ کردن (بعد از ۱۵۰ ثانیه)، مقدار b^* به‌صورت تدریجی کاهش یافت که نشان‌دهنده‌ی تخریب رنگ‌دانه‌های زرد از جمله کاروتنوئیدها و تشکیل محصولات قهوه‌ای میلارد و کاراملی شدن است (۳۹). در دمای 180°C درجه سانتی‌گراد، بیشترین افت b^* مشاهده شد که ناشی از تسریع واکنش‌های اکسیداسیون حرارتی و تخریب رنگدانه‌ها در دماهای بالا است. این روند در دمای 120°C درجه آهسته‌تر بود و تغییرات رنگ به تدریج اتفاق افتاد، که می‌تواند به دلیل حرارت‌دهی ملایم‌تر و حفظ بیشتر رنگ طبیعی بافت بادمجان باشد. از نظر آماری هم تغییرات مؤلفه‌ی زردی بین نمونه‌های سرخ شده با الئوژل معنی‌دار بود ($P < 0.05$) اما بین نمونه‌ی سرخ شده در اولئوژل و نمونه‌ی شاهد اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد ($P > 0.05$).



شکل ۶: بررسی تغییرات شاخص روشنایی (b^*) بادمجان در دماهای مختلف سرخ کردن در غلظت ۱۰ درصد.
Figure 6: Effect of temperature on lightness parameter (b^*) during frying of eggplant at a concentration 10%.

۳-۹- مقایسه‌ی شاخص b^* بین دو غلظت اولئوژل

در مقایسه بین دو غلظت، نتایج نشان داد که در نمونه‌های حاوی ۱۰ درصد موم کارنوبا، مقدار b^* در زمان‌های اولیه بالاتر بود و کاهش آن در مراحل پایانی کندتر اتفاق افتاد. این موضوع بیانگر پایداری رنگ بیشتر در غلظت‌های بالاتر اولئوژل است. علت این رفتار را می‌توان به ساختار متراکم‌تر ژل در غلظت ۱۰ درصد نسبت داد که منجر به کاهش نفوذ اکسیژن و کنترل بهتر نرخ انتقال حرارت می‌شود (۴۰). از سوی دیگر، در غلظت ۵ درصد به دلیل ساختار کمتر متراکم، انتقال حرارت سریع‌تر و در نتیجه تخریب رنگدانه‌ها زودتر اتفاق افتاده است. وجود آنتی‌اکسیدان‌های طبیعی در روغن کنجد مانند توکوفرول‌ها و لیگنان‌ها (به‌ویژه سزامین و سزامولین) نیز به حفظ رنگ زرد در هر دو غلظت کمک کرده اما اثر آن در غلظت ۱۰ درصد محسوس‌تر بوده است. به‌منظور ارزیابی چشمی تغییرات رنگ و ظاهر نمونه‌ها در طی فرایند سرخ‌کردن، تصاویر نمونه‌های بادمجان سرخ‌شده در تیمارهای مختلف ارائه گردیده است. شکل ۷ شامل مجموعه‌ای از ۱۸ تصویر برای اولئوژل با غلظت ۵ درصد و شکل ۸ شامل ۱۸ تصویر برای اولئوژل با غلظت ۱۰ درصد در سه دمای (۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد) و شش زمان سرخ‌کردن (۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰، ۱۸۰، ۲۱۰ و ۲۴۰ ثانیه) می‌باشد. همچنین، به‌منظور مقایسه بهتر، تصاویر نمونه‌های کنترل سرخ‌شده در روغن کنجد معمولی (۶ تصویر برای دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد در بازه زمانی مشابه) نیز در شکل ۹ نمایش داده شده‌اند. بررسی چشمی نشان داد که با افزایش زمان و دما، شدت قهوه‌ای‌شدن نمونه‌ها افزایش یافته و تیره‌شدن بافت در دماهای بالاتر محسوس‌تر است. نمونه‌های حاصل از اولئوژل به‌ویژه در غلظت ۱۰ درصد، در مقایسه با روغن معمولی، شفافیت و روشنی بیشتری را در مدت زمان‌های اولیه سرخ‌کردن حفظ کردند که این امر با نتایج حاصل از شاخص‌های رنگی (L^* , a^* , b^*) نیز هم‌خوانی دارد.



شکل ۷: تغییرات ظاهری نمونه‌های بادمجان سرخ‌شده در سه دما و ۶ زمان در غلظت ۵ درصد

Figure 7: Appearance changes of fried eggplant samples at three temperatures and six times at a concentration of 5%.



شکل ۸: تغییرات ظاهری نمونه‌های بادمجان سرخ‌شده در سه دما و ۶ زمان در غلظت ۱۰ درصد
Figure 8: Appearance changes of fried eggplant samples at three temperatures and six times at a concentration of 10%.



شکل ۹: تغییرات ظاهری نمونه‌های بادمجان سرخ‌شده در سه دما و ۶ زمان در روغن کنجد.
Figure 9: Appearance changes of fried eggplant samples at three temperatures and six times at Sesame oil.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از اولئوژل موم کارنوبا-روغن کنجد به عنوان محیط سرخ کردن، تأثیر معناداری بر بهبود ویژگی‌های رنگی بادمجان دارد. افزایش دما و زمان سرخ کردن منجر به کاهش روشنایی (L^*) و افزایش قرمزی (a^*) گردید، در حالی که شاخص زردی (b^*) روندی افزایشی در مراحل اولیه و سپس کاهشی در زمان‌های طولانی‌تر نشان داد. با این حال، نمونه‌های سرخ‌شده در اولئوژل با غلظت ۱۰ درصد در مقایسه با غلظت ۵ درصد و نمونه کنترل، پایداری رنگی بیشتر و شدت قهوه‌ای شدن کمتری از خود نشان دادند. این نتایج بیانگر آن است که ساختار سه‌بعدی شبکه مومی در اولئوژل، با محدود کردن نفوذ اکسیژن و کاهش انتقال حرارت مستقیم، از تخریب رنگ‌دانه‌ها و واکنش‌های اکسیداتیو جلوگیری می‌کند. همچنین، وجود ترکیبات آنتی‌اکسیدانی طبیعی روغن کنجد مانند توکوفرول‌ها، سزامین و سزامولین، نقش مهمی در حفظ رنگ مطلوب محصول ایفا کرده است. به‌طور کلی، استفاده از اولئوژل به عنوان جایگزین روغن مایع در فرآیند سرخ کردن می‌تواند مزایای متعددی به همراه داشته باشد. از منظر کیفیت محصول، ساختار ژلی اولئوژل منجر به کنترل بهتر فرآیند سرخ کردن و حفظ ویژگی‌های ظاهری و بافتی محصول می‌شود. همچنین، پایداری حرارتی مناسب اولئوژل‌ها، به‌ویژه در سیستم‌های مبتنی بر موم کارنوبا، امکان حفظ ساختار در دماهای بالای سرخ کردن را فراهم می‌آورد. در نهایت، از دیدگاه سلامت، استفاده از اولئوژل‌ها با هدف

کاهش مصرف چربی‌های آزاد و بهبود پروفایل لیپیدی محصولات سرخ‌شده، رویکردی نوین و قابل توجه در توسعه فرآورده‌های غذایی سالم‌تر محسوب می‌شود. چنین می‌توان نتیجه گرفت که کاربرد اولئوژل موم کارنوبا-روغن کنجد، به‌ویژه در غلظت بالاتر، می‌تواند به حفظ کیفیت رنگی، کاهش تغییرات ناخواسته حرارتی و تولید محصولات سرخ‌شده سالم‌تر منجر شود. بنابراین، این نوع اولئوژل می‌تواند به عنوان جایگزینی کارآمد و پایدار برای روغن‌های سنتی در صنایع غذایی مطرح گردد.

۵- منابع

1. Pathare P, Opara U, Said F. Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: a review. *Food Bioprocess Technol.* 2013; 6: 36-60. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0867-9>.
2. Varidi M, Ahmadzadeh-Hashemi S, Nooshkam M. Changes in fat uptake, color, texture, and sensory properties of Aloe vera gel-coated eggplant rings during deep-fat frying process. *Food Sci. Nutr.* 2023; 11(6): <https://doi.org/10.1002/fsn3.3238>.
3. Ankaraliligil P, Aydeniz-Guneser B. Oleogel-based frying medium: influence of rice bran wax-canola oil oleogel on volatile profile in fried fish fillets. *Discov Food.* 2024; 4 (90). <https://doi.org/10.1007/s44187-024-00154-z>.
4. Manzoor SH, Masoodi FA, Naqash F, Rashid R. Oleogels: Promising alternatives to solid fats for food applications. *Food Hydrocoll. Health.* 2022; 2 (10): 100058: <https://doi.org/10.1016/j.fhfh.2022.100058>.
5. Zubairee K, Yalcin H, Capar T. Sunflower oil-soybean wax oleogel: An oxidation stable alternative to traditional frying methods for doughnut. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 2024; 102(2):239-250: <https://doi.org/10.1002/aocs.12882>.
6. Mahmud N, Islam J, Oyom W, Adrah K, Tahergorabi R. A review of different frying oils and oleogels as alternative frying media for fat-uptake reduction in deep-fat fried foods. *Heliyon.* 2023;9(11):e21500: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21500>.
7. Chauhan DS, Khare A, Lal AB, Bebartta RP. Utilising oleogel as a frying medium for deep fried Indian traditional product (Mathri) to reduce oil uptake. *J. Indian Chem. Soci.* 2022; 99 (3): 100378: <https://doi.org/10.1016/j.jics.2022.100378>.
8. Kütahneçi E, Yalcin H. Evaluation of Frying Performance, Storage Stability, and In Vitro Digestion of Extra Virgin Olive Oil-Candelilla Wax Oleogel. *J. Food Sci.* 2025; 90 (7): <https://doi.org/10.1111/1750-3841.70405>.
9. Salehi F. Study of heat transfer and kinetic modeling of color changes during frying process of eggplant. *J. Food Res.* 2019; 29(2): 137-149 [In Persian].
10. Salehi F. Effect of coatings made by new hydrocolloids on the oil uptake during deep-fat frying: A review. *J. Food Process. Preserv.* 2020; 44(11): e14879: <https://doi.org/10.1111/jfpp.14879>.
11. Mousa R. M. A. Simultaneous inhibition of acrylamide and oil uptake in deep fat fried potato strips using gum Arabic-based coating incorporated with antioxidants extracted from spices. *Food Hydrocoll.* 2018; 83(1): 265-274: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.05.007>.
12. Lim J, Jeong S, Oh IK, Lee S. Evaluation of soybean oil-carnauba wax oleogels as an alternative to high saturated fat frying media for instant fried noodles. *Food Sci. Biotechnol.* 2017; 84: 788-794: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.06.054>.
13. Salehi F. Physicochemical characteristics and rheological behaviour of some fruit juices and their concentrates. *J. Food Meas. Charact.* 2020; 14 (5): 2472 - 2488. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00495-0>.
14. Pedreschi F, Moyano P, Kaack K, Granby K. Color changes and acrylamide formation in fried potato slices. *Food Res. Int.* 2005; 38(1): 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2004.07.002>.
15. Patel AR, Dewettinck K. Edible oil structuring: an overview and recent updates. *Food Funct.* 2014; 7(1): 20-29. <https://doi.org/10.1039/c5fo01006c>.
16. Sagiri SS, Samateh M, John G. Biobased Molecular Structuring Agents. *Food chem, funct, anal.* 2017; 23-52. <https://doi.org/10.1039/9781788010184-00023>.
17. Hadeel SY, Khalida SA, Walsh MK. Antioxidant Activity of Sesame Seed Lignans in Sunflower and Flaxseed Oils. *Food Research.* 2019; 4(3): 612-622. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.4\(3\).331](https://doi.org/10.26656/fr.2017.4(3).331).
18. Yılmaz E, Ögütçü M. The texture, sensory properties, and stability of cookies prepared with wax oleogels. *Food Funct.* 2015; 6: 1194- 1204. <https://doi.org/10.1039/C5FO00019J>.
19. Chauhan DS, Khare A, Lal AB, Bebartta RP. Utilising oleogel as a frying medium for deep fried Indian traditional product (Mathri) to reduce oil uptake. *J. Indian Chem. Soci.* 2022; 99 (2): 100378. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2022.100378>.
20. Pedreschi F, Moyano P, Kaack K, Granby K. Color changes and acrylamide formation in fried potato slices. *Food Res. Int.* 2005; 38 (1): 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2004.07.002>.
21. Mahmud N, Islam J, Oyom W, Adrah K, Adegoke S, Tahergorabi R. A review of different frying oils and oleogels as alternative frying media for fat-uptake reduction in deep-fat fried foods. *Heliyon.* 2023;9(11): e21500. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21500>.
22. Perneti M, Malssen K, Flöter E, Bot A. Structuring of edible oils by alternatives to crystalline fat. *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.* 2007; 12 (4): 221-231. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2007.07.002>.
23. Martins A, Vicente A, Cunha R, Cerqueira M. Edible oleogels: an opportunity for fat replacement in foods. *Food funct.* 2018; 2 (9): 758-773. <https://doi.org/10.1039/C7FO01641G>.
24. Gouveia L, Zago L, Moreira AS. Physical-Chemical Characterization and Nutritional Quality of Sesame Oil. *Nutrition health food sci.* 2017; 5(4): 1-7. <https://doi.org/10.15226/JNHFS.2017.00100>.
25. Ghafoorunissa, Hemalatha S, Vishnu Vardhana Rao M. Sesame lignans enhance antioxidant activity of vitamin E in lipid peroxidation systems. *Mol. Cell. Biochem.* 2004;262(1-2):195-202. <https://doi.org/10.1023/b:mcbi.0000038235.01389.a9>.
26. Zubairee K, Yalcin H, Capar T. Sunflower oil-soybean wax oleogel: An oxidation stable alternative to traditional frying methods for doughnut. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 2024;102(2):239-250. <https://doi.org/10.1002/aocs.12882>.
27. Aydeniz-Guneser B, Yılmaz E, Uslu E. Sunflower Oil-Beeswax Oleogels Are Promising Frying Medium for Potato Strips. *Eur. J. Lipid Sci. Technol.* 2021; 123 (10): 210063. <https://doi.org/10.1002/ejlt.202100063>.

28. Oyedeji AB, Sobukola OP, Henshaw F, Adegunwa MO, Ijabadeniyi OA, Sanni LO. Effect of Frying Treatments on Texture and Colour Parameters of Deep Fat Fried Yellow Fleshed Cassava Chips. *J. Food Qual.* 2017;1-10. <https://doi.org/10.1155/2017/8373801>.
29. Borojeni M, Goli S, Gharachourloo M. Effect of Roasted Sesame Oil on Qualitative Properties of Frying Oil during Deep-Fat Frying. *J Agr Sci Tech.* 2016; 18:1531-1542. 20.1001.1.16807073.2016.18.6.10.8.
30. Silvério Vieira E, Mársico C, Conte-Junior C, Damiani A, Canto ML, Monteiro F. Effects of different frying techniques on the color, fatty acid profile, and lipid oxidation of *Arapaima gigas*. *J. Food Process. Preserv.* 2018; 42 (11): 13820. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13820>.
31. Marangoni A, Garti N. *Edible Oleogels: Structure and Health Implications*. 2th ed. London: Academic Press; 2018.
32. Yamsaengsung R, Moreira RG. Modeling the transport phenomena and structural changes during deep fat frying: Part I: model development. *J. Food Eng.* 2002; 53 (1): 1-10. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(01\)00134-0](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00134-0).
33. Pedreschi F, Kaack K, Granby K. Acrylamide content and color development in fried potato strips. *Food Res. Int.* 2006; 39 (1): 40-46. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2005.06.001>.
34. Chen Y, Wang Y, Guan Q, Zhou X. Effect of Frying Temperatures and Times on the Quality and Flavors of Three Varieties of *Lentinus edodes*. *Foods.* 2024; 14 (1): 24. <https://doi.org/10.3390/foods14010024>.
35. Ankaraligil P, Aydeniz-Guneser B. Oleogel-based frying medium: influence of rice bran wax-canola oil oleogel on volatile profile in fried fish fillets. *Discover Food.* 2024; 4 (1): 1-22. <https://doi.org/10.1007/s44187-024-00154-z>.
36. Thakur D, Suhag R, Singh A, Upadhyay A, Prabhakar P, Sharma A. Comparative evaluation of soybean oil-carnauba wax oleogel as an alternative to conventional oil for potato chips frying. *Food Struct.* 2023; 37: <https://doi.org/10.1016/j.foosr.2023.100334>.
37. Li L, Lio G, Bogojevic O, Pedersen J, Guo ZH. Edible oleogels as solid fat alternatives: Composition and oleogelation mechanism implications. *Compr Rev Food Sci Food Saf.* 2022; 21 (3): 2077- 2104. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12928>.
38. Ran X, Lin D, Zheng L, Li Y, Yang H. Kinetic modelling of the mass and heat transfer of a plant-based fishball alternative during deep-fat frying and air frying and the changes in physicochemical properties. *J. Food Eng.* 2023; 350(1):111457. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111457>.
39. Adrah K, Adegoke S, Nowlin K, Tahergorabi R. Study of oleogel as a frying medium for deep-fried chicken. *J. Food Meas. Charact.* 2022; 16 (1): 1114-1123. <https://doi.org/10.1007/s11694-021-01237-6>.
40. Manjunatha SS, Mathews A, Patki PE. Modelling the kinetics of mass transfer and change in colour during deep fat frying of green peas (*Pisum sativum* L.) at different frying temperatures. *Heat mass transf.* 2019; 55 (11): 3087- 3102. <https://doi.org/10.1007/s00231-019-02637-7>.