



## Determination and prediction of discharge point of industrial and guilt frying oil during deep frying

Maryam Asghari Sehat<sup>1</sup>, Zahra BeigMohammadi<sup>2✉</sup> and Nafiseh Jahanbakhshian<sup>3</sup>

<sup>1</sup>M.Sc. Student, Department of Food Science and Technology, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>2</sup>Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>3</sup>Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Shahrekord Branch, Islamic Azad University, Shahrekord, Iran

✉ Corresponding author: [beigmohammadi.zahra@gmail.com](mailto:beigmohammadi.zahra@gmail.com) & [z.beigmohammadi@iau-tnb.ac.ir](mailto:z.beigmohammadi@iau-tnb.ac.ir)

### ARTICLE INFO

### ABSTRACT

#### Article type:

Research Article

#### Article history:

Received: July 16, 2023

Accepted: January 6, 2024

Published: July 4, 2024

#### Keywords:

Industrial and guilt frying oil, Polar Compounds, Deep Frying, Polar Compounds, Disposal Point, Prediction

**Background:** Deep-frying, a popular food preparation technique, has been associated with detrimental health effects due to the degradation of frying oils. Therefore, researchers have focused on establishing relationships between oil quality parameters and implementing strategies to minimize adverse effects on oil quality and enhance consumer health.

**Aims:** This study aims to investigate the qualitative changes in discharge point of industrial and guilt frying oils and develop kinetic models to predict these changes during the deep-frying process.

**Methods:** Over four consecutive days, each lasting six hours, 100 grams of semi-prepared potatoes were deep-fried for 8-10 minutes at 180°C in a fryer containing industrial and guilt frying oil. At 45-minute intervals, oil samples were collected from the fryer and analyzed for acidity, peroxide value, anisidine value, polar compounds, and absorption in the 200-900 nm range. Subsequently, kinetic models were fitted to the time-dependent changes in the measured oil quality parameters. To investigate the impact of frying duration on oil quality parameters, a standardized experimental setup was employed.

**Results:** The lowest levels of acidity, anisidine value, and polar compounds were observed in the control sample, while the highest levels were detected in the fourth-day oil sample. In contrast, peroxide value initially increased and gradually decreased from the second day onward, indicating a statistically significant ( $P < 0.05$ ) pattern. As frying duration increased, polar compounds and the intensity of absorption at the characteristic wavelength increased significantly.

**Conclusion:** A strong correlation ( $r^2 = 0.9865$ ) was established between the intensity of absorption at 380 nm and the percentage of total polar compounds, providing a sensitive and reliable indicator for monitoring oil degradation.



**Introduction:** Deep frying is a ubiquitous food preparation technique characterized by the complete immersion of food items in heated oil at temperatures ranging from 150 °C to 190 °C. This widespread popularity can be attributed to the distinctive sensory and organoleptic properties imparted to the cooked food. The rapid heat-transfer during deep frying leads to the formation of a crispy, golden-brown crust on the exterior of the food. This crust serves a dual purpose: it acts as a barrier, minimizing moisture loss from the interior and maximizing heat transfer to achieve efficient cooking. Furthermore, the Maillard reaction, facilitated by the high temperatures, generates a complex array of volatile flavor compounds responsible for the characteristic aroma and taste associated with deep-fried foods. These sensory attributes, including texture crispness, good taste, and unique aroma and color, are particularly appealing to younger demographics, contributing to the enduring popularity of deep-fried foods (Asokapandian et al., 2020). In the deep-frying process, intricate chemical reactions, including hydrolysis, oxidation, denaturation, isomerization, and, polymerization, ensue due to the interplay between oil and various factors such as moisture, oxygen, and heat. This results in the transfer of moisture from the food to the oil and the absorption of oil into the food, giving rise to the generation of deleterious compounds. Simultaneously, these reactions contribute to a decline in the quality of the oil. Additionally, chemical transformations and mechanical deformations, such as wrinkling, expansion, and crust formation, occur in the fried food products (Dash et al., 2022). The extent of these changes depends on various factors, such as the characteristics of food and oil, the type of fryer, the type of heating process, the increase in factors such as the rate of

integration of air and oil, the number of times of frying, and the duration of immersion of the food. Considering the very unfavorable effects of these reactions on oil quality, in order to reduce corruption and to identify and determine the point of oil disposal during the deep-frying process, various important indicators have been determined. The most important of these indicators are polar compounds, anisidine value, peroxide, volatile and non-volatile compounds, peroxide number, free fatty acids, acid value, iodine number, and smoke point. To mitigate the negative consequences of oil degradation on human health and ensure food safety, various indicators like free fatty acids, peroxide value, and smoke point have traditionally been used to monitor oil quality (Manzoor et al., 2022). This study explores the potential of using the absorption spectrum in the 200-900 nm range, particularly the intensity of polar compound absorption, as a novel indicator for determining the disposal point of frying oil. The disposal point refers to the stage at which the oil degrades to a level where it becomes unsuitable for further use.

**Material and methods:** For this purpose, on four consecutive days for 6 h with 45 min intervals, 100 g of semi-prepared potatoes from the Paris brand for 8 to 10 min in a fryer containing 4 L of Aftab brand oil. It was fried at a temperature of 180 °C, at the end of 6 hours of work, the fryer was turned off and some of the oil inside the fryer was removed in a container, after cooling the oil inside the container, 3 Falcon tubes of 50 ml (total 150) of the oil sample was separated to evaluate and perform various tests, and after labeling, it was placed in the freezer at -10 °C. This standardized approach using pre-prepared potatoes minimizes variability associated with raw material differences and ensures consistency across frying sessions. The fryer

operated for 6 hours with 45-minute intervals between frying batches to simulate a typical restaurant setting. To comprehensively evaluate the oil quality changes in the used on the 4 day samples and the control sample (total of 5 samples) throughout the frying process, five key parameters were assessed for each sample were performed: Acidity (measures the free fatty acid content, an indicator of oil hydrolysis), Peroxide Value (reflects the concentration of peroxides, formed during oil oxidation), Anisidine Value (provides insights into the presence of secondary oxidation products in the oil), Polar Compounds (the concentration of polar compounds, generated through various degradation reactions, serves as a marker for overall oil deterioration), Absorption Spectrum in 200-900 nm (with a specific focus on the intensity of absorption at 380 nm, constitutes the novel indicator under investigation. It is hypothesized that the absorption intensity within this specific wavelength range correlates with the concentration of polar compounds and, consequently, the degree of oil degradation). Kinetic modeling was performed using MATLAB software to mathematically describe the changes observed in the oil quality parameters over the four-day period. This approach allows for the identification of trends and potential reaction rates associated with oil degradation. Statistical analysis was conducted using SPSS software with a 95% confidence level to evaluate the significance of the observed changes. This step ensures the reliability and generalizability of the findings by minimizing the likelihood of chance observations. It is noteworthy that previous research has primarily focused on established oil quality parameters like free fatty acids and peroxide value. The present study aims to bridge this knowledge gap by exploring the potential of the absorption spectrum,

particularly in the 200-900 nm range, as a novel indicator for determining the tipping point of frying oil. This approach has received less attention in prior investigations (Senanayake, 2018), and its potential to provide a more sensitive and efficient method for monitoring oil quality warrants further exploration.

**Results and discussion:** The findings of this study support the hypothesis that frying time significantly impacts various oil quality parameters. We observed a positive correlation between frying duration and the levels of acidity, polar compounds, anisidine value, and absorption within the 200-900 nm range. These observations were statistically significant ( $p < 0.05$ ), indicating a robust relationship between extended use and oil deterioration. This trend aligns with established knowledge – as frying progresses, the oil undergoes a cascade of degradation reactions, leading to the accumulation of these markers. The control sample exhibited the lowest levels of all measured parameters, reflecting its fresh and unused state. Conversely, the oil used for the fourth consecutive day displayed the highest levels, signifying the most advanced stage of degradation. This observation is visually depicted through the kinetic modeling performed using MATLAB software, allowing for a comprehensive understanding of the changes over time. Thus, the lowest level of acidity was related to the control treatment, and the highest level of acidity was related to the fourth-day sample. Interestingly, the changes in peroxide value displayed a non-monotonic pattern. Initially, the peroxide value increased with frying time, reflecting the formation of peroxides during the early stages of oxidation. However, this value subsequently decreased. This deviation from the trend observed for other parameters might be

attributed to the decomposition of peroxides into secondary oxidation products at later stages of frying. Further investigation is warranted to elucidate the underlying mechanisms responsible for this specific pattern. The peroxide changes first increased and then decreased, and the changes in this treatment were different from those of the other treatments. While the acidity and anisidine values surpassed established thresholds for oil rejection (Zhang et al., 2022), indicating a point of unacceptable degradation, polar compounds and peroxide value did not reach these limits within the timeframe of this study. This suggests that the proposed indicator, absorption intensity within the 200-900 nm range, might be more sensitive in detecting earlier stages of oil degradation compared to traditional methods. The anisidine values were significantly different between the treatment and control samples ( $p < 0.05$ ). As the number of days passed, the amount of anisidine in the fried oil increased, which was statistically significant ( $p < 0.05$ ). Thus, the lowest number of anisidines was related to the control treatment, and the highest number of anisidines was related to the fourth-day sample. There was a significant difference in polar compounds between the treatment and control sample ( $p < 0.05$ ). As the number of days elapsed, the number of polar compounds in fried oil increased, with a statistically significant difference ( $p < 0.05$ ). Thus, the lowest amount of polar compounds was related to the control treatment, and the highest amount was related to the sample on the fourth day. The absorption at in 200-900 nm was significantly different between the treatment and control samples ( $p < 0.05$ ). With the passage of time, the amount of absorption in 200-900 nm range in fried oil increased, which was statistically significantly different ( $p < 0.05$ ). This aligns with the findings of

Tynek et al. (2021), who reported a similar increase in absorption within the 200-900 nm range as frying progressed. The observed positive correlation between frying time and absorption within the 200-900 nm range, particularly at 380 nm, strengthens the potential of this novel indicator. This finding supports the notion that the intensity of absorption by polar compounds, generated during various degradation reactions, can be a valuable tool for monitoring oil quality. Researchers suggest that measuring polar compounds is a crucial indicator of oil breakdown. The amount of polar compounds formed during frying is influenced by factors like moisture content, oil composition, and the presence of antioxidants. This study demonstrates that the absorption spectrum, particularly the intensity of absorption by polar compounds, offers a potentially more convenient and potentially more sensitive method for assessing oil quality compared to traditional approaches.

**Conclusion:** This study underscores the importance of monitoring and controlling oil quality during deep-frying. The findings demonstrate that measuring changes in various oil quality parameters, including the newly proposed absorption intensity of polar compounds within the 200-900 nm range, offers valuable insights into the degradation process. By implementing these methods at different intervals, food establishments can optimize frying practices, minimize oil waste, and ultimately ensure the production of safe and high-quality deep-fried food products.

## تعیین و پیش‌بینی نقطه دورریز روغن سرخ‌کردنی صنف و صنعت طی سرخ‌کردن عمیق

مریم اصغری صحت<sup>۱</sup>، زهرا بیگ‌محمدی<sup>۲</sup> و نفیسه جهانبخشیان<sup>۳</sup><sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران<sup>۲</sup> استادیار، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران<sup>۳</sup> استادیار گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران✉ مسئول مکاتبه: [z.beigmohammadi@iau-tnb.ac.ir](mailto:z.beigmohammadi@iau-tnb.ac.ir) & [beigmohammadi.zahra@gmail.com](mailto:beigmohammadi.zahra@gmail.com)

## چکیده

## مشخصات مقاله

**زمینه مطالعاتی:** به دلیل اثرات نامطلوب سرخ‌کردن عمیق بر سلامت انسان، یافتن ارتباط و وابستگی بین معیارهای مورد ارزیابی روغن‌ها و انجام فرآیندهایی جهت کاهش آثار منفی ناشی از آن‌ها در کیفیت روغن و افزایش سلامت مصرف‌کننده مورد توجه قرار گرفته است.

**هدف:** از انجام این تحقیق بررسی تغییرات کیفی روغن‌های صنف و صنعت و مدل‌سازی سینتیکی این تغییرات طی سرخ‌کردن عمیق می‌باشد تا از فساد آن‌ها جلوگیری گردد.

**روش کار:** بدین منظور در ۴ روز متوالی و هر روز طی ۶ ساعت، به فواصل ۴۵ دقیقه، ۱۰۰ گرم سیب‌زمینی نیمه‌آماده به مدت ۱۰-۸ دقیقه داخل سرخ‌کن حاوی ۴ لیتر روغن صنف و صنعت با دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد سرخ شد. در انتها، مقداری از روغن داخل سرخ‌کن به‌عنوان نمونه برداشته شده آزمون‌های اسیدیت، پراکسید، آنیزیدین، ترکیبات قطبی و همچنین جذب در ناحیه ۲۰۰ تا ۹۰۰ نانومتر انجام شد. سپس مدل‌های سینتیکی متناسب شاخص‌های متغیر نیز با زمان فیت گردیدند.

**نتایج:** پایین‌ترین میزان اسیدیت، آنیزیدین و ترکیبات قطبی مربوط به تیمار شاهد و بالاترین میزان این ترکیبات مربوط به نمونه روغن روز چهارم بود. اما میزان پراکسید در ابتدا افزایش و از روز دوم به مرور کاهش پیدا کرد که این تغییرات نیز معنی‌دار بودند ( $P < 0/05$ ).

**نتیجه‌گیری نهایی:** با توجه به نتایج به‌دست آمده از روغن‌های مورد آزمایش و اندازه‌گیری همبستگی میان جذب‌ها و درصد ترکیبات قطبی مشخص شد که بیشترین همبستگی میان جذب‌ها و ترکیبات قطبی، در طول موج ۳۸۰ نانومتر بود و بین شدت‌های جذب به‌دست آمده در این طول موج و درصد ترکیبات قطبی همبستگی بالا ( $r^2 = 0/98165$ ) وجود داشت.

## نوع مقاله:

علمی پژوهشی

## تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۴۰۲/۴/۲۵

پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۱۶

انتشار: ۱۴۰۳/۴/۱۴

## کلید واژه:

روغن سرخ‌کردنی صنف و صنعت، سرخ‌کردن عمیق، ترکیبات قطبی، نقطه دورریز، پیش‌بینی

## مقدمه

به استفاده مکرر و طولانی مدت از روغن سرخ‌کردنی با دمای بین ۱۹۰ - ۱۵۰ سانتی‌گراد جهت حرارت‌دادن و غوطه‌ورشدن مواد غذایی، سرخ‌کردن عمیق گفته می‌شود. این روش تهیه غذا به دلیل ایجاد ویژگی‌های حسی و ارگانولپتیکی جذاب در ماده غذایی از جمله تردی بافت، عطر و طعم منحصر به فرد، ظاهر مورد پسند و افزایش سرعت و سهولت پخت‌وپز، بسیار مورد توجه قرار گرفته است (اومارا و همکاران ۲۰۱۹). در فرآیند سرخ‌کردن عمیق، در اثر تعامل بین روغن و عواملی مانند رطوبت، اکسیژن و حرارت، واکنش‌های شیمیایی هیدرولیزاسیون، اکسیداسیون، دناتوریزاسیون، ایزومریزاسیون و پلیمریزاسیون اتفاق افتاده که با انتقال رطوبت از ماده غذایی به روغن و جذب روغن به داخل ماده غذایی منجر به تولید ترکیبات مضر و کاهش کیفیت روغن و همچنین تغییرات شیمیایی و مکانیکی مانند چروکیدگی، انبساط و تشکیل پوسته در غذا می‌شوند (دودو و همکاران ۲۰۲۲). میزان این تغییرات به عواملی مانند ویژگی‌های غذا و روغن، نوع سرخ‌کن، افزایش عواملی همچون سرعت ادغام هوا و روغن، دفعات سرخ‌کردن و زمان غوطه‌وری غذا در روغن بستگی دارد. با توجه به تأثیرات نامطلوب این واکنش‌ها در کیفیت روغن، مهم‌ترین شاخص‌هایی که جهت کاهش فساد و تعیین نقطه دورریز روغن‌ها در سرخ‌کردن تعیین شده عبارتند از: ترکیبات قطبی، عدد آنیزیدین، عدد پراکسید، ترکیبات فرار و غیرفرار، اسید چرب آزاد، ارزش اسیدی، عدد یدی و... (چن و همکاران ۲۰۲۱).

از ارزیابی تغییرات به وجود آمده در ویژگی‌های کیفی روغن سرخ‌شده می‌توان به این دلایل اشاره کرد: اسیدهای چرب آزاد، شاخص کیفی مهمی در تمام مراحل فرآوری و ذخیره‌سازی روغن می‌باشند که بر اثر عوامل مختلفی مانند رطوبت حاصل از واکنش‌های اکسایشی سرخ‌کردن، انباشتگی محصولات غذایی سرخ‌شده داخل سرخ‌کن، سردشدن روغن باقی‌مانده از روز قبل، افزایش یافته و به مرور سبب ایجاد عطر و طعم نامطلوب و کاهش کیفیت روغن می‌شود، میزان قابل قبول این معیار کمتر از ۰/۰۷ درصد می‌باشد (آشکین و کایا ۲۰۲۰). در همه روغن‌ها با

افزایش زمان سرخ‌کردن، بر اثر تجزیه کربونیل، مقدار آنیزیدین افزایش یافته و می‌تواند معیاری جهت اندازه‌گیری محصولات ثانویه اکسیداسیون باشد زیرا پایداری حرارتی مناسبی دارد. ارزیابی روغن با اندازه‌گیری شاخص آنیزیدین همراه با پراکسید کاملاً بی‌نقص می‌باشد (زیرا افزایش مقدار پراکسید از یک جایی به بعد به صورت آنیزیدین نمایان می‌شود) (منظور و همکاران ۲۰۲۳). همچنین عدد پراکسید نشان‌دهنده میزان اکسیژن فعالی است که بر اثر اکسیداسیون، به‌طور شیمیایی با روغن یا چربی به صورت پراکسید و به‌ویژه هیدروپراکسید پیوند برقرار کرده و دید پتاسیم را اکسید می‌کند. مقدار پراکسید در طول سرخ‌کردن افزایش می‌یابد اما از یک جایی به بعد کاهش پیدا کرده و بر روی یک عدد ثابت می‌ماند و افزایش این شاخص، در میزان آنیزیدین نمایان می‌شود، اما سبب ایجاد عطر و طعم نامطلوب و تیره‌تر شدن رنگ روغن می‌شود (در حالت استاندارد میزان پراکسید نباید از ۲ میلی‌اکی‌والان در هر کیلوگرم روغن بیشتر شود). اجزایی از روغن‌ها از جمله محصولات اکسیداسیون طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق می‌باشند، ترکیبات قطبی نام دارند که وزن مولکولی و قطبیت بالایی داشته و به دلیل اطلاعات مهمی که در رابطه با ترکیبات تشکیل‌شده در طول سرخ‌کردن مواد غذایی در اختیار ما قرار می‌دهند، از مهم‌ترین و مطمئن‌ترین شاخص‌های ارزیابی تغییرات معیارهای روغن جهت تعیین نقطه دورریز می‌باشند (ژیانگ و همکاران ۲۰۲۲). ترکیبات قطبی در اثر حرارت و در طول سرخ‌کردن غذاها به وجود می‌آیند، مانند آلدئیدها، کتون‌ها، الکل‌ها و اسیدها که با افزایش اسیدهای چرب غیراشباع همچون اسیدلینولئیک افزایش می‌یابند و اگر میزان کل این ترکیبات از ۲۵ درصد عبور کند نشان‌دهنده غیر قابل مصرف بودن روغن است (فرهوش و صالحی ۲۰۲۱). جهت اندازه‌گیری میزان جذب، نمونه‌ها با دستگاه اسپکتروفتومتر در طیف جذبی مدنظر ارزیابی می‌شوند، زیرا در هر محدوده طیفی و در یک طول موج معین یک ماکزیمم جذبی وجود دارد که در واقع هدف پیدا کردن این نقطه است. این نقطه ماکزیمم، نسبت به ترکیبات قطبی معادل شده و با این ترکیبات سنجیده می‌شود و همبستگی میان جذب و ترکیبات قطبی را توسط نتایج آماری نشان می‌دهد. با تعیین طول موج شاخص در هر نمونه روغن مشخص می‌شود

مدت ۸ تا ۱۰ دقیقه داخل سرخ‌کن حاوی ۴ لیتر روغن صنف و صنعت با دمای ۱۸۰ سانتی‌گراد سرخ شد. از دلایل انتخاب این دما و زمان می‌توان به شبیه‌سازی کردن دما و زمان سرخ‌شدن سیب‌زمینی‌ها به مراکز تهیه غذا و رستوران‌ها و همچنین استفاده حداکثری از شرایط آزمایشگاه تا پایان وقت اداری و سرخ‌کن‌های صنعتی موجود در آن اشاره کرد.

#### نمونه‌برداری روغن

در انتهای ۶ ساعت کار، سرخ‌کن خاموش شده و مقداری از روغن داخل سرخ‌کن در بشر به‌عنوان نمونه برداشته شد. پس از خنک شدن روغن داخل بشر، ۳ لوله فالكون ۵۰ میلی‌لیتری (در کل ۱۵۰ میلی‌لیتر) از نمونه روغن جهت ارزیابی و انجام دادن آزمون‌های مختلف جدا کرده و پس از لیبیل‌گذاری، داخل فریزر با دمای ۱۰- سانتی‌گراد قرار داده شد (مُریرا و همکاران ۲۰۱۶).

#### ارزیابی ویژگی‌های شیمیایی روغن

##### اندازه‌گیری میزان اسیدیته

براساس استاندارد ملی ایران به شماره ۴۱۷۸ (۲۰۱۱) جهت اندازه‌گیری میزان اسیدیته از روش استفاده از اتانول داغ همراه با شناساگر استفاده شد. جهت اندازه‌گیری اسیدیته، ۲۰ گرم از نمونه روغن به یک ارلن منتقل شد و داخل ارلن دیگر ۵۰ میلی‌لیتر اتانول ۹۶ درصد به دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد (نقطه جوش اتانول) رسید، به ارلن حاوی اتانول داغ، ۰/۵ میلی‌لیتر (چند قطره) معرف فنول‌فتالین اضافه شد و بر روی استبرری که زیر بورت حاوی سود ۰/۱ نرمال بود قرار گرفت و تیتراسیون شروع شد، تا زمانی که رنگ اتانول داغ داخل بشر که سفید است به رنگ صورتی کم‌رنگ (پوست پیازی) دربیاید و این رنگ برای ۱۵ ثانیه ثابت مانده و رنگ واضحی ایجاد کند، تیتراسیون ادامه یافت. در واقع بعد از تغییر رنگ محلول داغ داخل بشر از سفید به صورتی به نقطه‌ای می‌رسیم که اتانول داغ توسط سود خنثی شده و تیتراسیون متوقف می‌شود. سپس این اتانول خنثی شده به ارلن دارای ۲۰ گرم نمونه روغن اضافه شد و زیر استبرر قرار گرفت و با محلول سود ۰/۱ نرمال تیتراژ شد تا جایی که رنگ محلول داخل ارلن، صورتی کم‌رنگ شود که این رنگ طبق

که هر نوع روغن شدت جذب مخصوص به خود را در نقطه دورریز دارد (بن و همکاران ۲۰۱۹)

امروزه مدل‌سازی روشی مؤثر جهت شناخت و توصیف فرآیندها شناخته شده است؛ مانند ارزیابی تغییرات ویژگی‌های کیفی روغن صنف و صنعت طی سرخ‌کردن عمیق و پیش‌بینی آن‌ها تحت شرایط متفاوت فرضی، که به این طریق می‌توان اثرات نامطلوب فرآیند سرخ‌کردن را با دانش کافی از چگونگی کنترل افزایش مقدار این ویژگی‌ها کاهش داد. در واقع مدل‌سازی سینتیکی علم مطالعه سرعت‌ها و مکانیسم‌ها می‌باشد که در این مطالعات، هدف پیش‌بینی و بررسی تغییرات فیزیکی و شیمیایی طی فرآیندهای متفاوت و یافتن زمان و دمای بهینه می‌باشد. دقت در پیش‌بینی مدل‌سازی، رابطه مستقیم با اندازه‌گیری هر کدام از شاخص‌های مورد ارزیابی مانند اسیدیته، پراکسید، آنیزیدین، ترکیبات قطبی و ... در سرخ‌کردن عمیق دارد. طی فرآیند سرخ‌کردن، مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر کیفیت محصول سرخ‌شده، درجه حرارت روغن و زمان حرارت‌دادن به غذا می‌باشد (تادس و فیکیر ۲۰۲۲). هدف از انجام این تحقیق ارزیابی تغییرات کیفی روغن‌های صنف و صنعت و مدل‌سازی سینتیکی این تغییرات طی سرخ‌کردن عمیق می‌باشد تا از غیرقابل‌مصرف شدن این روغن‌ها در اثر افزایش نامطلوب شاخص‌های روغن مانند پراکسید و آنیزیدین جلوگیری شود.

#### مواد و روش‌ها

##### مواد مصرفی

لوازم، تمام مواد شیمیایی و حلال‌های مورد استفاده برای انجام ارزیابی فاکتورهای روغن توسط آزمایشگاه و از کارخانه مرک آلمان خریداری شدند.

##### سرخ‌کردن سیب‌زمینی

روغن سرخ‌کردنی صنف و صنعت برند آفتاب از شرکت مارگارین ورامین خریداری شد و سیب‌زمینی نیمه‌آماده مورد استفاده از برند پریس انتخاب شد. فرآیند سرخ‌کردن در ۴ روز متوالی و هر روز طی ۶ ساعت، به فواصل ۴۵ دقیقه یک بار انجام شد، به این صورت که ۱۰۰ گرم سیب‌زمینی نیمه‌آماده به

استفاده از شاخص جذب در ناحیه فرابنفش - مرئی به‌منظور تعیین نقطه دورریز روغن سرخ‌کردنی مورد ارزیابی قرار گرفت. در این پژوهش عمل اسکن به‌عنوان یک روش سریع توسط دستگاه اسپکتروفتومتر بر روی نمونه‌های روغن انجام گرفت. جهت اندازه‌گیری میزان جذب از دستگاه اسپکتروفتومتر T90 استفاده شد که به همین منظور نمونه‌های روغن در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۵ دقیقه داخل دستگاه نگهداری شدند و شدت جذب از طول موج ۲۰۰ تا ۹۰۰ نانومتر با فواصل ۱۰ نانومتری اندازه‌گیری شد (ژائو و همکاران ۲۰۲۱).

### تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه و تحلیل نتایج با استفاده از طرح کاملاً تصادفی و آنالیز واریانس یک طرفه و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از روش چند دامنه‌ای دانکن صورت گرفت. ارزیابی داده‌ها به کمک نرم‌افزار (SPSS 23) در سطح اطمینان ۹۵٪ انجام شده و نمودارها توسط نرم‌افزار اکسل ۲۰۱۹ رسم گردید. ترسیم و بررسی تمامی مدل - سازی‌های سیستمی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB نسخه ۷ صورت گرفت (ژیانگ و همکاران ۲۰۲۰).

### نتایج و بحث

**تعیین میزان اسیدیته، پراکسید، آنزیدین، ترکیبات قطبی و جذب**

نتایج حاصل از آنالیزهای انجام شده برای هر تیمار در شکل ۱ نشان داده شده است. مشخص گردید که همراه با افزایش زمان سرخ‌کردن سیب‌زمینی‌ها و با گذشت روزها میزان اسیدیته، ترکیبات قطبی، آنزیدین و جذب در روغن سرخ‌کرده افزایش پیدا کرد که از نظر آماری، این تغییرات اختلاف معناداری با هم دارند ( $P < 0/05$ ). به‌طوری که پایین‌ترین میزان اسیدیته، آنزیدین، ترکیبات قطبی و جذب مربوط به تیمار شاهد و بالاترین میزان این شاخص‌ها مربوط به نمونه روز چهارم بود. اما طبق شکل ۱ روند تغییرات تیمار پراکسید با سایر تیمارها متفاوت بود، به این صورت که مقدار عددی پراکسید ابتدا افزایش و در روزهای بعد روند کاهشی داشته و این درست برعکس تغییرات سایر تیمارها بود. همچنین نکته قابل توجه دیگری که

استاندارد ۴۱۷۸ حداقل ۱۵ ثانیه و در آزمایشگاه به مدت ۳۰ ثانیه باید پایدار بماند، و این نقطه پایان تیتراسیون تعیین شد. در نهایت میزان اسیدیته روغن برحسب درصد جرمی به دست آمد.

### اندازه‌گیری میزان پراکسید

جهت تعیین عدد پراکسید نمونه‌های روغن، براساس استاندارد ملی ایران به شماره ۴۱۷۹ (۲۰۱۷) از روش یدومتری استفاده می‌شود. نمونه روغن داخل ارلن، در محلول ایزواکتان و اسید استیک حل شد و محلول یدید پتاسیم اشباع و آب مقطر به ارلن اضافه گردید و ید آزاد شده توسط پراکسیدها با روش یدومتری اندازه‌گیری توسط معرف نشاسته و محلول تیوسولفات سدیم ۰/۰۱ درصد اندازه‌گیری شد، که نقطه پایانی تیتراسیون زمان بی‌رنگ شدن محلول بنفش رنگ می‌باشد و در نهایت میزان پراکسید نمونه روغن برحسب میلی‌اکی والان اکسیژن فعال در هر کیلوگرم روغن تعیین شد.

### اندازه‌گیری میزان آنزیدین

جهت اندازه‌گیری مقدار آنزیدین نمونه‌های روغن، براساس استاندارد ملی ایران به شماره ۴۰۹۳ (۲۰۱۶) عمل شد. بررسی و تعیین میزان عددی آنزیدین توسط اسپکتروفتومتر مدل JASCO ساخته شده توسط کشور ژاپن صورت گرفت که دستگاه طیف‌سنج با استفاده از حلال ایزواکتان به‌گونه‌ای تنظیم شد تا در طول موج ۳۵۰ نانومتر جذب صفر را نشان دهد.

### اندازه‌گیری میزان ترکیبات قطبی

جهت اندازه‌گیری ترکیبات قطبی براساس استاندارد ملی ایران به شماره ۴۰۸۷ (۲۰۱۱) از ستون کروماتوگرافی استفاده شد. در این روش سیلیکاژل به ابعاد ۰/۰۶۳ تا ۰/۲ میلی‌متر (۷۰ تا ۲۳۰ مش) به‌عنوان فاز ثابت و مخلوط دو ماده پترولیوم‌بنزن سبک و دی-اتیل‌تر به نسبت (۷۸ به ۱۳) به‌عنوان فاز متحرک نیز مورد استفاده قرار گرفت. در این آزمون ترکیبات قطبی و غیرقطبی از طریق کروماتوگرافی ستونی جدا شدند و ترکیبات غیرقطبی شسته و سپس توزین شدند و در نهایت مقدار ترکیبات قطبی از روی اختلاف وزن اندازه‌گیری شد (لی و همکاران ۲۰۱۹).

**اندازه‌گیری میزان جذب در ناحیه ۲۰۰ تا ۹۰۰ نانومتر**



ترکیبات آلدهیدی و کتون، آلکان‌ها و آلکن‌های کوتاه زنجیر تولید می‌گردد؛ که این امر سبب کاهش میزان عددی پراکسید طی فرآیند سرخ کردن می‌شود اما در این پژوهش به دلیل استفاده روغن به صورت روزانه، محدود بودن مقدار نمونه‌های غذایی و تعداد کم‌تر نسبت به مراکز تولید و فروش عمده محصولات غذایی سرخ‌شده، روند افزایشی و کاهشی میزان پراکسید به طور واضح و گسترده مشاهده نشد (عزیزی و همکاران ۲۰۱۸).

طبق مشاهدات نیکزاد و همکارانش در سال ۲۰۲۱، تعیین شد که هرچه درصد غیر اشباع بودن روغن کم‌تر باشد، سرعت اکسیداسیون نیز کم‌تر بوده و در نتیجه میزان تولید محصولات اولیه و به دنبال آن مقادیر محصولات ثانویه مانند آنتیزیدین نیز کم‌تر خواهد بود، با گذشت روزها میزان عدد آنتیزیدین در روغن سرخ‌کرده افزایش پیدا کرد به طوری که پایین‌ترین عدد آنتیزیدین مربوط به تیمار شاهد و بالاترین عدد آنتیزیدین مربوط به نمونه روز چهارم بود که با نتایج تحقیق حاضر منطبق بود. همچنین آسوکاپاندیان و همکارانش در سال ۲۰۲۰ مشاهده کردند عدد آنتیزیدین نسبت به محصولات اولیه اکسیداسیون یعنی پراکسیدها باثبات‌تر می‌باشد و با افزایش مدت زمان حرارت‌دهی در طول سرخ کردن میزان آنتیزیدین بالاتری ایجاد خواهد شد، این افزایش اکسیداسیون و تولید محصولات ثانویه می‌تواند به دلیل تخریب آنتی‌اکسیدان‌های موجود مانند ترکیبات فنولیک در روغن باشد، که این مساله افزایش مقدار آنتیزیدین در روغن که ناشی از استفاده طولانی مدت از روغن هست را ثابت می‌کند.

اندازه‌گیری ترکیبات قطبی مهم‌ترین آزمایش برای روغن در حال تجزیه معین شد. تاکنون شاخص‌های متعددی برای ارزیابی کیفیت روغن‌ها و چربی‌های خوراکی (به خصوص روغن‌های سرخ‌کردنی) پیشنهاد شده است، ولی اندازه‌گیری ترکیبات قطبی از دقت و تکرارپذیری فوق‌العاده‌ای برخوردار بوده و روش خوبی برای تعیین میزان تخریب روغن‌ها در طول فرآیندهای حرارتی است (حجتی ۲۰۲۱). این ترکیبات شامل تری‌آسیل-گلیسرول‌های پلیمری و دیمیری (ناشی از پلیمری شدن حرارتی تری‌آسیل‌گلیسرول‌ها)، تری‌آسیل‌گلیسرول‌های اکسیده، مونو و دی‌آسیل‌گلیسرول‌ها و اسیدهای چرب آزاد (ناشی از هیدرولیز تری‌آسیل‌گلیسرول‌ها) هستند.

در نتایج به دست آمده از این تحقیق مشاهده شد این بود که حداکثر میزان اسیدیته و آنتیزیدین در روزهای نهایی از نقطه فساد هر کدام از این شاخص‌ها عبور کرد اما میزان حداکثری ترکیبات قطبی و پراکسید نیز به نقطه فساد و دورریز مخصوص به هر یک از این شاخص‌ها نرسید.

اسیدیته معیاری جهت تعیین فساد هیدرولیتیکی روغن می‌باشد که در اثر هیدرولیز اسیدهای چرب و در حضور آب افزایش می‌یابد. از این رو پایش اسیدیته یکی از فاکتورهای کنترل کیفیت اکسیداسیون روغن است (هرچی و همکاران ۲۰۲۰؛ جلیلی و رشیدی ۲۰۲۱)، همچنین تحقیقات تینک و همکارانش در سال ۲۰۲۱ نشان داد که نوع روغن و میزان رطوبت عوامل اثرگذار در افزایش اسیدیته پس از هر مرحله حرارت‌دهی هستند، نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل روغن‌های سرخ‌کردنی صنف و صنعت و مدت زمان حرارت‌دهی بر مقدار اسیدیته سبب افزایش این شاخص می‌شود، که علت آن نیز بدیهی بوده و به دلیل هیدرولیز بیشتر و شکسته شدن پیوندها در اثر بیشتر سرخ‌شدن و تولید بالاتر اسیدهای چرب آزاد می‌باشد، (مشاهدات این پژوهشگران کاملاً با نتایج این تحقیق هم‌سو بود).

براساس تحقیقات منظور و همکارانش در سال ۲۰۲۳، مشخص شد که با گذشت زمان میزان عدد پراکسید در روغن سرخ‌کرده ابتدا افزایش پیدا کرد به طوری که پایین‌ترین عدد پراکسید مربوط به تیمار شاهد و بالاترین عدد پراکسید مربوط به نمونه روز دوم بوده و پس از آن در روزهای سوم و چهارم کاهش یافت.

البته باید توجه داشت اکسایش لیپیدی زمانی ایجاد می‌شود که غلظت اکسیژن در روغن اکسید شده آنقدر بالا برود که سرعت اکسایش لیپیدی مستقل از فشار اکسیژن باشد. دمیدن اکسیژن یا هوا به داخل نمونه و یا انجام فرآیند در لایه‌های نازک یک میلی-متری چنین فرآیندهای اکسایشی را فراهم می‌آورد (منظور و همکاران ۲۰۲۲)

اگرچه پراکسید شایع‌ترین متغیر در خصوص اندازه‌گیری فساد روغن‌ها می‌باشد اما برای بررسی سلامت و کیفیت روغن‌های مصرفی به تنهایی کافی نیست، زیرا با گذشت زمان و ادامه دار شدن فرآیند سرخ‌کردن، ترکیبات پراکسید تخریب شده و

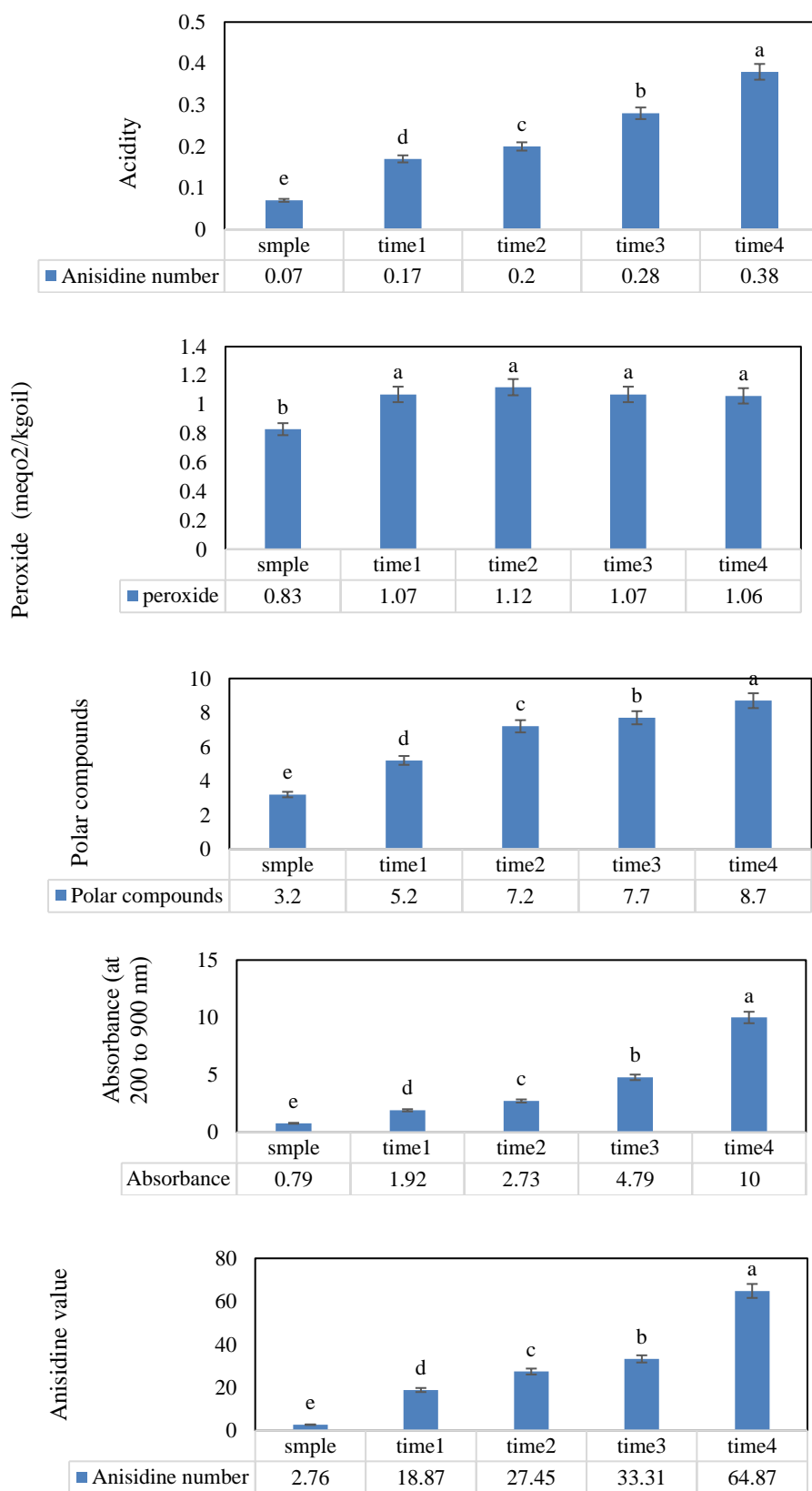


Figure 1- Acidity, peroxide, percentage of polar compounds, absorbance in 200 to 900 nm and anisidine number in of industrial and frying oil during 4 days of use for frying potatoes

که بیشترین همبستگی میان جذب‌ها و ترکیبات قطبی، در طول موج ۳۸۰ نانومتر بود. همچنین میان شدت جذب‌های به‌دست آمده در طول موج شاخص و درصد ترکیبات قطبی کل نمونه-های روغن در طول زمان سرخ‌کردن، اختلاف معناداری وجود داشت (وو و همکاران ۲۰۲۲).

نتایج مقایسه میانگین جذب در ۲۰۰ تا ۹۰۰ نانومتر در نمونه‌های روغن سرخ‌شده سیب‌زمینی در جدول ۱ آمده است. جذب در ۲۰۰ تا ۹۰۰ نانومتر بین تیمارها و نمونه شاهد اختلاف معناداری داشت ( $p < 0.05$ ). با گذشت روزها میزان جذب در ۲۰۰ تا ۹۰۰ نانومتر در روغن سرخ‌کرده افزایش پیدا کرد که از نظر آماری نیز اختلاف معناداری با هم داشتند ( $p < 0.05$ ). به‌طوری که پایین‌ترین میزان جذب در ۲۰۰ تا ۹۰۰ نانومتر مربوط به تیمار شاهد و بالاترین جذب در ۲۰۰ تا ۹۰۰ نانومتر مربوط به نمونه روز چهارم بود.

#### مدل‌سازی سینتیکی

در این تحقیق جهت نشان دادن بهتر تغییرات هر یک از شاخص‌های روغن صنف و صنعت از معادله سینتیکی درجه صفر برای اسیدیت، معادله درجه ۱ برای میزان جذب در ۲۰۰ تا ۹۰۰ نانومتر و معادله درجه یک محدودشده برای ترکیبات قطبی و آنیزیدین استفاده گردید. برای شاخص پراکسید به‌دلیل اینکه در ابتدا مقدار این شاخص افزایش پیدا کرده و سپس کاهش می‌یابد و تغییرات قابل پیش‌بینی ندارد، نمودار و معادله مناسبی تعریف نشد.

**Table 1- Comparison of absorption at 200-900 nm in fried potato oil sample**

Absorption at 200-900 nm	Treatments
0.79 ± 0.08 <sup>a</sup>	Control
1.92 ± 0.12 <sup>b</sup>	First day
2.73 ± 0.04 <sup>c</sup>	Second day
4.79 ± 0.1 <sup>d</sup>	Third day
10.00 ± 0.63 <sup>e</sup>	Fourth day

Similar small letters in a column indicate the absence of significant differences between the means ( $p > 0.05$ )

گزارش شده است تری‌آسیل‌گلیسرول‌های اکسیده و پلیمری به-طور کامل جذب بدن شده و آثار سمی بر سلامت انسان دارند (فرمانی و همکاران ۲۰۱۹) میزان اولیه ترکیبات قطبی کل، تأثیر زیادی بر کیفیت روغن‌های سرخ‌کردنی طی فرآیند سرخ‌کردن دارد و روغن‌های دارای درصد ترکیبات قطبی اولیه کم‌تر نیز جهت سرخ‌کردن مواد غذایی مناسب‌تر هستند، بنابراین میزان بالاتر ترکیبات قطبی در روغن صنف و صنعت نشان‌دهنده کیفیت پایین‌تر این روغن‌های خوراکی خواهد بود (سنانایاک و همکاران ۲۰۱۸)

همچنین در این تحقیق مشخص شد با افزایش زمان سرخ‌کردن میزان ترکیبات قطبی و شدت جذب در طول موج شاخص افزایش یافت که نتیجه‌گیری با مقاله‌ای که از آن برای تعیین میزان جذب استفاده شده بود مطابقت داشت. با توجه به اسکن‌های به‌دست آمده از نمونه‌های مورد آزمایش و اندازه گرفتن همبستگی میان جذب‌ها و درصد ترکیبات قطبی مشخص گردید

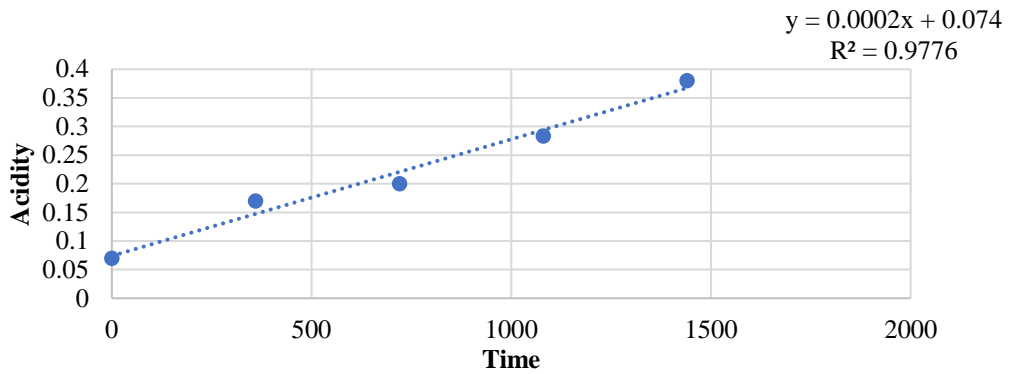


Figure 2- Kinetic diagram of zero degree corresponding to changes in acidity

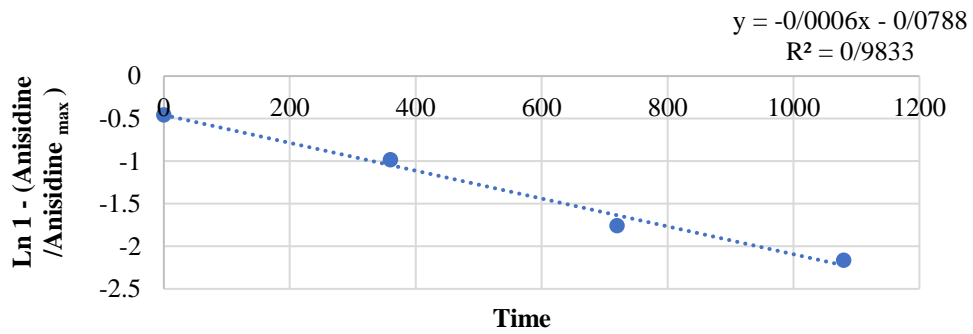


Figure 3- First-order kinetics diagram of the fit of anisidine changes

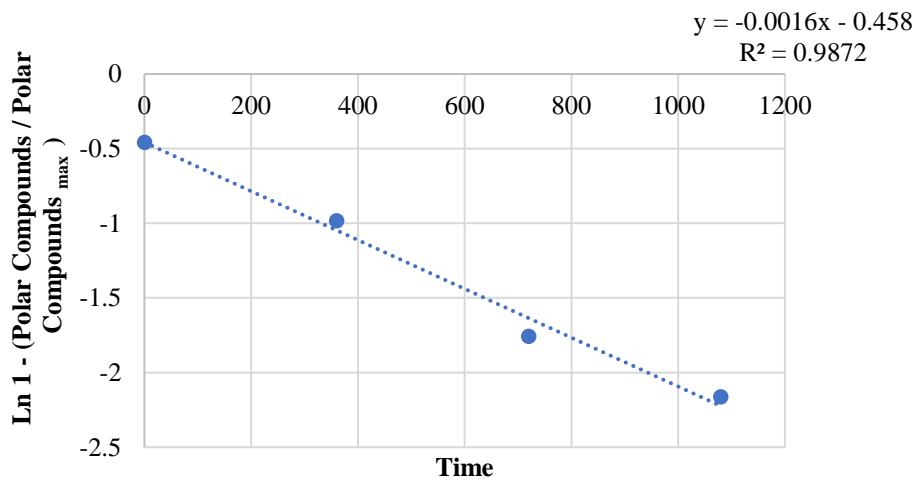


Figure 4- Kinetics diagram of the first order limited proportional to the changes of the polar compounds

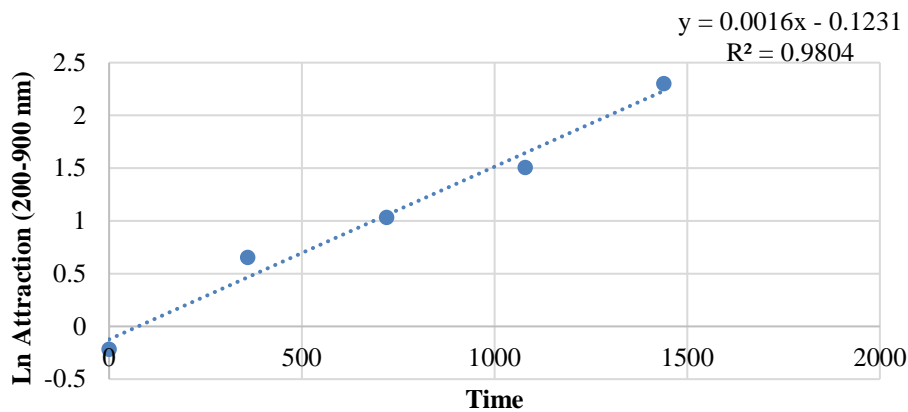


Figure 5- First-order kinetic diagram corresponding to absorption changes in the region of 200 to 900 nm

فرمول [۱]

$$A = A_0 \pm kt$$

$$A = 0.074 + 0.0002t$$

A = میزان اسیدیته

A<sub>0</sub> = عدد به دست آمده از نمودار

k = ثابت سرعت

t = زمان

برای آنیزیدین پس از رسم هر چهار نمودار سینتیکی (شکل ۳)، نمودار سینتیکی درجه ۱ محدود شده به دلیل ضریب تبیین بالا به عنوان بهترین نمودار انتخاب شد و معادله مرتبط با این تیمار با توجه به نمودار به دست آمد:

$$\ln(1 - C/C_{\max}) = \pm Kt$$

$$\ln(1 - C/64.07) = -0.0006t$$

فرمول [۲]

C = میانگین میزان آنیزیدین در هر روز

C<sub>max</sub> = بیشترین مقدار میانگین که مربوط به روز چهارم است

k = ثابت سرعت

t = زمان

برای ترکیبات قطبی (شکل ۴)، پس از رسم هر چهار نمودار، نمودار سینتیکی درجه ۱ محدود شده به دلیل ضریب تبیین بالا به عنوان بهترین نمودار انتخاب شد و معادله مرتبط با این تیمار با توجه به نمودار به دست آمد:

$$\ln(1 - C/C_{\max}) = \pm Kt$$

$$\ln(1 - C/8.7) = -0.0016t$$

فرمول [۳]

C = میانگین میزان ترکیبات قطبی در هر روز

به منظور انتخاب مناسب‌ترین مدل توصیف‌کننده تغییرات ویژگی‌های کیفی در طول سرخ کردن سیب‌زمینی نیمه‌آماده از نمودارهای به دست آمده از نرم‌افزار Excel استفاده شد، به این صورت که نمودار هر چهار معادله سینتیکی را رسم کرده و بهترین نمودار انتخاب شد. در این نمودارها محور افقی (X) برای هر ۴ نمودار، براساس کل زمان سرخ کردن سیب‌زمینی‌ها در این چهار روز (۱۴۴۰، ۱۰۸۰، ۷۲۰، ۳۶۰، صفر) تعیین شد و محور عمودی (Y) برای هر ویژگی براساس میانگین کل نتایج به دست آمده مربوط به هر روز مشخص شد (در کل ۵ عدد که یک نمونه شاهد و چهار نمونه برای چهار روز انجام کار است). برای هر نمودار یک ضریب تبیین (R<sup>2</sup>) و یک معادله متناسب با آن به دست می‌آید که در این معادله، ثابت سرعت (k) همان ضریب X می‌باشد. نمودار دارای استانداردترین ضریب تبیین (R<sup>2</sup>) به عنوان بهترین نمودار انتخاب می‌شود؛ به این صورت که معادله‌ای که دارای ضریب تبیین از ۰/۹۷ به بالا باشد به عنوان مناسب‌ترین معادله مشخص می‌شود. با توجه به نمودارهای سینتیکی به دست آمده برای هر یک از ترکیبات روغن، معادله سینتیکی مربوط به این ترکیبات نیز مشخص می‌شود:

برای اسیدیته، پس از رسم هر چهار نمودار (شکل ۲)، نمودار سینتیکی درجه صفر به دلیل داشتن ضریب تبیین بالا به عنوان بهترین نمودار انتخاب شد و معادله مرتبط با این نمودار به این صورت تبیین گردید:

چربی عمل می‌کند. غذاهای سرخ‌شده به دلیل سرعت و سهولت در تهیه، دارای محبوبیت بسیاری در بین افراد جامعه هستند (لی و همکاران ۲۰۱۶). علاوه بر این، مواد غذایی سرخ‌شده به دلیل داشتن ویژگی‌های حسی جذاب مانند رنگ، عطر و طعم، بافت ترد و ویژه و خوش طعم بودن، بسیار مورد توجه مصرف‌کنندگان قرار می‌گیرند. هدف از این پژوهش بررسی میزان تغییرات شاخص‌های مختلف روغن‌های صنف و صنعت و امکان تعیین و پیش‌بینی نقطه دورریز این روغن‌ها طی سرخ‌کردن عمیق بود که مشاهده شد با گذشت زمان میزان عدد آنیزیدین، اسیدیته و ترکیبات قطبی در روغن سرخ‌کرده افزایش پیدا کرد (خاکباز و همکاران ۱۳۹۸). به طوری که پایین‌ترین میزان آنیزیدین، اسیدیته و ترکیبات قطبی مربوط به تیمار شاهد و بالاترین میزان این شاخص‌ها مربوط به نمونه روز چهارم بود، اما مقدار پراکسید در ابتدا افزایش پیدا کرده و سپس کاهش پیدا می‌کند (دانش و همکاران ۲۰۲۲). همچنین اسکن نمونه‌های روغن و اندازه‌گیری همبستگی میان جذب‌ها و ترکیبات قطبی در ناحیه ۲۰۰ تا ۹۰۰ نانومتر و در طول موج ۳۸۰ روش خوبی بوده و می‌تواند در پیدا کردن نقطه دورریز و فساد روغن به ما کمک کند.

$C_{max}$  = بیشترین مقدار میانگین که مربوط به روز چهارم است  
 $k$  = ثابت سرعت (از روی نمودار به دست می‌آید)  
 $t$  = زمان

برای جذب در ناحیه ۲۰۰ تا ۹۰۰ نانومتر (شکل ۵)، پس از رسم هر چهار نمودار سینتیکی، نمودار سینتیکی درجه ۱ به دلیل ضریب تبیین بالا به عنوان بهترین نمودار انتخاب شد و معادله مرتبط با این نمودار به این صورت تبیین گردید:

$$\ln A = \ln A_0 \pm kt \quad \text{فرمول [۴]}$$

$$\ln A = -0.12 + 0.0016 t$$

$\ln A_0$  = به دست آمده از روی معادله مربوط به نمودار

$k$  = ثابت سرعت (از روی معادله مربوط به نمودار به دست می‌آید)

$t$  = زمان

#### نتیجه‌گیری

یکی از محبوب‌ترین روش‌ها برای تهیه مواد غذایی در سراسر جهان استفاده از روغن‌ها جهت سرخ‌کردن و غوطه‌وری غذا داخل روغن می‌باشد. روغن خوراکی منبع انرژی و اسیدهای چرب ضروری است که به عنوان حامل ویتامین‌های محلول در

## References

- Aşkin B and Kaya Y, 2020. Effect of deep frying process on the quality of the refined oleic/linoleic sunflower seed oil and olive oil. *Journal of Food Science and Technology* 57(12): 4716-4725.
- Asokapandian S, Swamy G.J and Hajjul H, 2020. Deep fat frying of foods: A critical review on process and product parameters. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 60(20), pp.3400-3413.
- Azizi-lalabadi M, Mousavi MM, Piravi-vanak Z and Azadmard-Damirchi S, 2018. MCPD fatty acid esters in vegetable oils: formation, analysis and toxicology. *Journal of Food and Bioprocess Engineering* 1(1): 71-80.
- Ben Hammouda I, Márquez-Ruiz G, Holgado F, Freitas F, Da Silva MG and Bouaziz M, 2019. Comparative study of polymers and total polar compounds as indicators of refined oil degradation during frying. *European Food Research and Technology* 245: 967-976.
- Chen J, Zhang L, Li Y, Zhang N, Gao Y and Yu X, 2021. The formation, determination and health implications of polar compounds in edible oils: Current status, challenges and perspectives. *Food Chemistry* 364: 130451.
- Dash K.K, Sharma M and Tiwari A, 2022. Heat and mass transfer modeling and quality changes during deep fat frying: A comprehensive review. *Journal of Food Process Engineering* 45(4), p.e13999.
- Dodoo D, Adjei F, Tulashie SK, Adukpoh KE, Agbolegebe RK, Gawou, K and Manu GP, 2022. Quality evaluation of different repeatedly heated vegetable oils for deep-frying of yam fries. *Measurement: Food* 7, p.100035.
- Farhoosh R and Salehi H, 2021. Frying stability of virgin and refined sesame oils as compared to refined olive oil. *Authorea Preprints*.
- Farmani J, Tirkarian B, Razmpour M, 2019. Evaluation of physicochemical properties of sesame oil from local extraction stores of Mazandaran province. *Food Science and Technology* 15(84): 175 -187.
- Herchi W, Bouali I, Bahashwan S, Rochut S, Boukhchina S, Kallel H and Pepe C, 2020, Changes in phospholipid composition, protein content and chemical properties of flaxseed oil during development. *Plant Physiology and Biochemistry* 54, 1 -5.
- Institute of Standards and Industrial Research of Iran (ISIRI), 2011, Animal and vegetable fats and oils Determination of acid value and acidity Test method. 4178, 1st. Revision, 7-10.
- Institute of Standards and Industrial Research of Iran (ISIRI), 2016, Animal and vegetable fats and oils Determination of anisidine value -Test method. 4093, 2nd. Revision.
- Institute of Standards and Industrial Research of Iran (ISIRI), 2017, Animal and vegetable fats and oils- Determination of peroxide value- Iodometric (visual) endpoint determination. 4179, 2nd. Revision.
- Institute of Standards and Industrial Research of Iran (ISIRI), 2011, Animal and vegetable fats and oils Determination of polar compounds content. 4087, 1st. Revision, 8-10.
- Jalili M and Rashidi L, 2021. To investigate the quality of olive oils distributed in the market based on the determined specifications in the national standard of Iran. *Food Research Journal* 31(1): 161-176.
- Jiang H, Chen W, Jia Z and Tao F, 2020. Physicochemical properties of short-term frying oil for chicken wing and its oxidative stability in an oil-in-water emulsion. *Food Science and Nutrition* 8(1): 668-674.
- Khakbaz Heshmati M, Naseri N, Pezeshki A and Jafarzadeh Moghaddam, M. 2019. Effect of frying process on the oxidative and thermal properties of sesame and grape seed oil optimized formulation. *Food Research Journal* 30(4): 27-38.
- Li J, Cai W, Sun D and Liu Y, 2016. A quick method for determining total polar compounds of frying oils using electric conductivity. *Food Analytical Methods* 9(5): 1444-1450.
- Li X, Wu G, Yang F, Meng L, Huang J, Zhang H, Jin Q and Wang, X., 2019. Influence of fried food and oil type on the distribution of polar compounds in discarded oil during restaurant deep frying. *Food Chemistry* 272: 12-17.
- Manzoor S, Masoodi, FA, Rashid R, Ahmad M and ul Kousar M, 2022. Quality assessment and degradative changes of deep-fried oils in street fried food chain of Kashmir, India. *Food Control* 141: 109184.
- Manzoor S, Masoodi FA and Rashid R, 2023. Influence of food type, oil type and frying frequency on the formation of trans-fatty acids during repetitive deep-frying. *Food Control* 147, p.109557.

- Moreira RG, Castell-Perez EE, Barrufet MA, 2016. Deep-fat frying fundamental and application. An Aspen Publication, Maryland.
- Nikzad N, Ghavami M, Seyedain-Ardabili M, Akbari-Adergani. B, and Azizinezhad. R, 2021. Effect of deep frying process using sesame oil, canola and frying oil on the level of bioactive compounds in onion and potato and assessment of their antioxidant activity. *Food Science and Technology* 41, pp.545-555.
- O'Mara K, Adams M, Burford MA, Fry B and Cresswell T, 2019. Uptake and accumulation of cadmium, manganese and zinc by fisheries species: Trophic differences in sensitivity to environmental metal accumulation. *Science of the Total Environment* 690: 867-877.
- Senanayake N, 2018. Enhancing oxidative stability and shelf life of frying oils with antioxidants. *Inform Magazine* 29: 6-13.
- Tadesse Zula A and Fikre Teferra T, 2022. Effect of frying oil stability over repeated reuse cycles on the quality and safety of deep-fried Nile tilapia fish (*Oreochromis niloticus*): a response surface modeling approach. *International Journal of Food Properties* 25(1): 315-325.
- Tynek M, Pawłowicz R, Gromadzka J, Tylingo R, Wardencki W and Karlovits G, 2021, Virgin rapeseed oils obtained from different rape varieties by cold pressed method—their characteristics, properties and differences, *European Journal of Lipid Science and Technology* 114(3).
- Wu H, Richards MP and Undeland I, 2022. Lipid oxidation and antioxidant delivery systems in muscle food. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 21(2): 1275-1299.
- Zhang L, Chen J, Zhang J, Sagymbek A, Li Q, Gao Y, Du S and Yu X, 2022. Lipid oxidation in fragrant rapeseed oil: Impact of seed roasting on the generation of key volatile compounds. *Food Chemistry: X* 16: 100491.
- Zhao L, Zhang M, Wang H and Devahastin S, 2021. Effects of carbon dots in combination with rosemary-inspired carnosic acid on oxidative stability of deep frying oils. *Food Control* 125: 1079.