

Journal Pre-proofs

Investigation of physicochemical, rheological and sensory characterization of caramel produced from fructose

Ehsan Firoozi, Akram Sharifi, Milad Pero

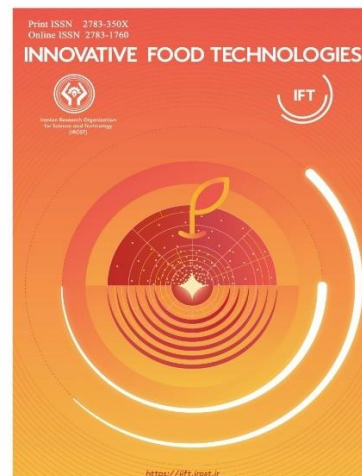
DOI: <https://doi.org/10.22104/ift.2025.7724.2224>

To appear in: Innovative Food Technologies (IFT)

Received Date: 9 July 2025

Revised Date: 11 August 2025

Accepted Date: 11 August 2025



Please cite this article as: Ehsan Firoozi, Akram Sharifi, Milad Pero, Investigation of physicochemical, rheological and sensory characterization of caramel produced from fructose, *Innovative Food Technologies* (2025), doi: <https://doi.org/10.22104/ift.2025.7724.2224>

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.

© 2023 The Author(s). Published by iroast.org.

مقاله پژوهشی

بررسی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، رئولوژیکی و حسی کارامل تولیدشده از فروکتوز

احسان فیروزی^۱، اکرم شریفی^{۲*}، میلاد پرو^۳^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی علوم و صنایع غذایی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران^۲ دانشیار، گروه مهندسی علوم و صنایع غذایی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران^۳ دکترای مهندسی صنایع غذایی، پالایشگاه غلات زر، گروه صنعتی پژوهشی فرهیختگان زرنام، کرج، ایران* نویسنده مسئول: asharifi@iaau.ac.ir

چکیده

رنگ کارامل از جمله رنگ‌های پرکاربرد در صنایع غذایی است. هدف این پژوهش، تولید کارامل از فروکتوز و بررسی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، رئولوژیکی و حسی آن بود. کارامل فروکتوز با چهار روش مختلف در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس تهیه شد (روش اول: ۸۴/۰۶٪ فروکتوز + ۷/۱۰٪ آمونیاک + ۸/۸۴٪ اسید سولفوریک، ۹۰ دقیقه؛ روش دوم: ۷۹/۰۱٪ فروکتوز + ۹/۳۵٪ آمونیاک + ۱۱/۶۳٪ اسید سولفوریک، ۹۰ دقیقه؛ روش سوم: ۹۱/۸۵٪ فروکتوز + ۳/۳۴٪ آمونیاک + ۴/۸۳٪ اسید سولفوریک، ۴ ساعت؛ روش چهارم: ۸۸/۹۳٪ فروکتوز + ۴/۵۳٪ آمونیاک + ۶/۵۴٪ اسید سولفوریک، ۴ ساعت). نمونه‌ها از نظر شاخص قهوه‌ای شدن، قدرت احیاکنندگی، هیدروکسی‌متیل‌فورفورال، ترکیبات فنولی، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، رنگ، ویسکوزیته و ویژگی‌های حسی بررسی شدند. نتایج نشان داد روش اول از نظر عطر، رنگ و قابلیت جویدن و روش دوم از نظر ویسکوزیته، زاویه هیو و شدت شیرینی برتری دارد. بیشترین فعالیت آنتی‌اکسیدانی مربوط به نمونه کارامل شاهد با ۷۰/۴۸ درصد و کمترین فعالیت آنتی‌اکسیدانی مربوط به نمونه کارامل تهیه شده به روش چهارم با ۲۹/۰۴ درصد بود. هم‌چنین بیشترین میزان ترکیبات فنولی مربوط به نمونه کارامل شاهد با ۱۲۷۶/۷ میلی گرم اسید گالیک در هر گرم بود. پس از آن نمونه کارامل فروکتوز تهیه شده به روش اول ترکیبات فنولی برابر با ۱۱۵۱/۹ میلی گرم اسید گالیک / گرم داشت که این میزان نسبت به نمونه‌های کارامل تهیه شده به سه روش دیگر بیشتر بود. کمترین میزان ترکیبات فنولی مربوط به نمونه کارامل تهیه شده به روش دوم بود. علاوه بر این نتایج ارزیابی پروفایل ترکیبات فنولی موجود در نمونه کارامل با استفاده از روش کروماتوگرافی مایع با فشار بالا (HPLC) نشان داد که ترکیبات فنولی شناسایی شده در نمونه کارامل شامل سیناپیک اسید (۱۲۶۲/۹ میلی گرم / میلی لیتر)، پروتوکاتچونیک اسید (۹۲۶/۱ میلی گرم / میلی لیتر)، کاتچین (۵۰۱/۶ میلی گرم / میلی لیتر) و الاگیک اسید (۲۲۰/۰۹ میلی گرم / میلی لیتر) بود.

واژه‌های کلیدی: کارامل، شربت فروکتوز، خصوصیات فیزیکوشیمیایی، ویژگی‌های حسی

۱- مقدمه

امروزه تولید رنگ‌های خوراکی یکی از نیازهای مهم در صنایع غذایی به‌شمار می‌رود. در صنایع غذایی به دلایل مختلف، از جمله برای جبران رنگی که در اثر فرآیند از بین می‌رود، یا ایجاد رنگی خاص در فرآورده‌هایی که فاقد رنگ هستند (مانند نوشابه‌ها و انواع بستنی)، تقویت و تشدید رنگ و یا یکنواخت کردن رنگ غذا، رنگ افزوده می‌شود [۱، ۲].

یکی از مهم‌ترین رنگ‌های افزودنی مورد استفاده در صنعت غذا، رنگ کارامل است [۳]. رنگ‌های کاراملی طیف وسیعی از رنگ‌های پایدار، از زرد روشن تا قهوه‌ای قرمز و قهوه‌ای بسیار تیره، برای استفاده در غذاها و نوشیدنی‌ها را فراهم می‌کنند و بسته به رنگ و سطح استفاده می‌تواند به صورت مایع یا جامد باشند [۴]. کارامل در اثر حرارت دادن کربوهیدرات‌ها و در طی فرآیند کاراملیزاسیون تولید می‌شود. رنگدانه کارامل حاوی حلقه فوران، قندها و همچنین گروه‌های عاملی مختلف مانند گروه‌های فنولی^۱، هیدروکسیل^۲، آلدئید^۳ و کربوکسیل^۴ فراوان است که باعث می‌شود کارامل خواص فیزیکوشیمیایی و خاصیت آبدوستی بالا داشته باشد [۵]. یکی از کربوهیدرات‌های مورد استفاده برای تولید رنگ کارامل، فروکتوز^۵ است. فروکتوز یک شیرین کننده طبیعی است که به وفور در میوه‌ها و عسل یافت می‌شود. این قند مونوساکاریدی احیاکننده می‌باشد که به خوبی در واکنش میلارد شرکت می‌کند و با ایجاد رنگ قهوه‌ای مناسب در سطح محصولات نانویی مانند کیک، کلوچه و نان قابلیت کاربرد زیادی در این صنایع دارد [۳، ۶].

مطالعات متعددی به بررسی تأثیر نوع قند و شرایط حرارت‌دهی بر ویژگی‌های عملکردی و آنتی‌اکسیدانی کارامل پرداخته‌اند. در این زمینه، صباغ‌زاده و همکاران (۱۳۹۹)، نشان دادند که افزایش pH و زمان حرارت‌دهی موجب تشدید قهوه‌ای شدن و بهبود قدرت احیاکنندگی و فعالیت آنتی‌اکسیدانی، به‌ویژه در کارامل تهیه‌شده از فروکتوز، می‌گردد (۳). کرامت و ملک (۱۳۸۰)، با جداسازی رنگ کاراملی از ملاس چغندر قند و بررسی ویژگی‌های آن، نشان دادند که رنگ تولیدی از نظر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، پایداری در برابر pH، دما و نور، و نیز حداکثر جذب نوری، مشابه رنگ کارامل مصرفی در نوشابه‌های سیاه بوده و می‌تواند جایگزین مناسبی برای نمونه‌های وارداتی باشد (۲). Kokeb و همکاران (۲۰۱۵)، به بررسی سنتز کارامل نوع III با استفاده از گلوکز و آمونیاک در شرایط قلیایی پرداختند. نتایج نشان داد که افزایش pH قلیایی، دما و زمان تماس موجب افزایش شدت رنگ و بهبود خواص فیزیکوشیمیایی کارامل شد؛ به گونه‌ای که محصول نهایی با ویسکوزیته پایین، پایداری بالا و فاقد سمیت تولید گردید (۱۳). Karseno و همکاران (۲۰۱۸)، تأثیر pH و دمای حرارت‌دهی را بر شدت قهوه‌ای شدن و ویژگی‌های آنتی‌اکسیدانی قند نارگیل بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش pH و دما، شدت قهوه‌ای شدن، محتوای فنول کل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی به‌طور معنی‌داری افزایش یافت و ارتباط مستقیمی میان قهوه‌ای شدن و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی قند مشاهده شد (۱۲).

در حال حاضر، بازار جهانی کارامل یکی از بازارهای رو به رشد در صنایع غذایی است. با توجه به افزایش مصرف این نوع رنگ خوراکی، سرمایه‌گذاری در این حوزه از نظر اقتصادی بسیار سودآور محسوب می‌شود. از این رو، بهینه‌سازی فرمولاسیون تولید کارامل با کیفیت بالا به یکی از اهداف اصلی صنعت گران و سرمایه‌گذاران در این زمینه تبدیل شده است. در حال حاضر، سرانه تولید کارامل در ایران با توجه به منابع در دسترس و نیاز بازار داخلی بسیار پایین است، و بخش قابل توجهی از نیاز صنایع غذایی از طریق واردات تأمین می‌شود. با توجه به اهمیت کاهش وابستگی به واردات و استفاده بهینه از منابع داخلی، هدف از پژوهش حاضر، تولید کارامل از فروکتوز و بررسی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، رئولوژیکی و حسی آن بود.

¹ Phenolic groups

² Hydroxyl

³ Aldehyde

⁴ Carboxyl

⁵ Fructose

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، شربت فروکتوز ۵۵٪ از پالایشگاه غلات زر (ایران) تهیه شد. سایر مواد شیمیایی از شرکت مرک (آلمان) تأمین شدند. همچنین یک نمونه کارامل تجاری (با منبع ساکارز) از بازار تهیه و به‌عنوان شاهد برای مقایسه با کارامل تولیدی مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۱- تولید کارامل فروکتوز

برای تولید کارامل فروکتوز، از چهار روش مختلف استفاده شد. در روش اول، ۱۴۰ گرم شربت فروکتوز با ۱۳ میلی‌لیتر آمونیاک ۲۵ درصد مخلوط شد. سپس ۸ میلی‌لیتر اسید سولفوریک ۹۵ درصد به‌صورت قطره‌قطره و هم‌زمان با هم‌زدن، به مخلوط افزوده شد. مخلوط حاصل به مدت ۹۰ دقیقه در بن‌ماری با دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس قرار گرفت تا رنگ کارامل تشکیل شود. در روش دوم، ۱۰۰ گرم شربت فروکتوز با ۱۳ میلی‌لیتر آمونیاک ۲۵ درصد مخلوط شد. سپس ۸ میلی‌لیتر اسید سولفوریک ۹۵ درصد به همان صورت اضافه و هم‌زمان هم‌زده شد. در ادامه، ۲۰۰ میلی‌لیتر اتانول و ۱۰۰ میلی‌لیتر آب به مخلوط افزوده شد. این ترکیب به مدت ۹۰ دقیقه در بن‌ماری با دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس حرارت داده شد. پس از اتمام فرآیند، فاز اتانول با استفاده از دستگاه روتاری تبخیر در خلأ حذف شد. در روش سوم، ۱۴۰ گرم شربت فروکتوز با ۶/۵ میلی‌لیتر آمونیاک ۲۵ درصد مخلوط شد. سپس ۴ میلی‌لیتر اسید سولفوریک ۹۵ درصد به‌صورت قطره‌قطره به آن افزوده و هم‌زمان هم‌زده شد. این مخلوط به مدت ۴ ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس در بن‌ماری نگهداری و هم‌زده شد تا کارامل تشکیل شود. در روش چهارم، مشابه روش سوم عمل شد، با این تفاوت که به جای ۱۴۰ گرم، از ۱۰۰ گرم شربت فروکتوز استفاده شد. سایر مراحل مشابه روش سوم بود [۷]. برای مقایسه، یک نمونه از رنگ کارامل تجاری موجود در بازار تهیه و به‌عنوان شاهد در آنالیزها مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۲- تعیین شدت قهوه‌ای شدن

برای تعیین شدت قهوه‌ای شدن، نمونه کارامل تولیدی رقیق و میزان جذب آن با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (UV-1206, Shimadzu) اندازه‌گیری شد. بدین منظور، مقدار ۱۰۰ میلی‌گرم از نمونه در بالن ژوژه ریخته و با آب مقطر به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد. سپس میزان جذب آن در طول موج ۶۱۰ نانومتر تعیین گردید [۸].

۲-۳- تعیین قدرت احیا کنندگی

به منظور ارزیابی قدرت احیا کنندگی، محلول رقیق شده کارامل به میزان ۱ میلی‌لیتر با ۱ میلی‌لیتر بافر فسفات سدیم ۰/۲ مولار و pH برابر با ۶/۶ مخلوط شد. سپس، ۱ میلی‌لیتر محلول پتاسیم فری‌سیانید ۱٪ به مخلوط افزوده گردید. ترکیب حاصل به مدت ۲۰ دقیقه در دستگاه بن‌ماری (LAUDA, E200) در دمای ۵۰ درجه سلسیوس قرار گرفت. پس از آن، ۱ میلی‌لیتر محلول تری‌کلرواستیک اسید ۱۰٪ به مخلوط اضافه و نمونه به مدت ۱۰ دقیقه در دستگاه سانتریفیوژ با سرعت ۷۵۰ دور بر دقیقه سانتریفیوژ شد. پس از سانتریفیوژ، ۱ میلی‌لیتر از سوپرناتانت جدا شده و با ۱ میلی‌لیتر آب مقطر و ۲۰۰ میکرولیتر محلول فریک کلرید ۰/۱٪ مخلوط گردید. سپس جذب نمونه‌ها توسط دستگاه اسپکتروفتومتری در طول موج ۷۰۰ نانومتر اندازه‌گیری شد [۹].

۴-۲- تعیین هیدروکسی متیل فورفورال^۱ و فورفورال^۲

برای تعیین دو حد واسط فرآیند کاراملیزاسیون، یعنی ۵-هیدروکسی متیل فورفورال (HMF) و فورفورال، از محلول‌های کاریز یک، کاریز دو و محلول بی‌سولفیت سدیم ۰/۲ درصد استفاده شد. برای تهیه محلول کاریز یک، ۱۵ گرم فروسیانور پتاسیم با ۳ مولکول آب مقطر به درون بالن ژوژه ۱۰۰ میلی‌لیتری منتقل شد و در مقداری آب مقطر حل شد. سپس با آب مقطر به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد. برای تهیه محلول کاریز دو نیز، ۳۰ گرم استات روی با ۲ مولکول آب مقطر، با استفاده از کمی آب مقطر حل شده و سپس به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد. محلول بی‌سولفیت سدیم ۰/۲٪ نیز با حل کردن ۰/۲ گرم هیدروژن سولفیت در بالن ژوژه ۱۰۰ میلی‌لیتری و رساندن حجم آن به ۱۰۰ میلی‌لیتر با آب مقطر، تهیه گردید. پس از تهیه محلول‌های مورد نیاز، ۵ گرم از نمونه کارامل در کمی آب مقطر حل شده و به بالن ژوژه ۵۰ میلی‌لیتری منتقل شد، سپس ۰/۵ میلی‌لیتر از هر یک از محلول‌های کاریز یک و دو به آن اضافه شده و خوب مخلوط گردید و با آب مقطر به حجم ۵۰ میلی‌لیتر رسانده شد. در مرحله بعد محلول صاف شده و ۱۰ میلی‌لیتر اول آن دور ریخته شد و بقیه جمع‌آوری گردید. به دو لوله آزمایش، هر یک ۵ میلی‌لیتر از محلول صاف شده کارامل منتقل شد. به یکی از دو لوله ۵ میلی‌لیتر آب مقطر و به لوله دیگر ۵ میلی‌لیتر بی‌سولفیت سدیم جهت غیرفعال شدن جذب هیدروکسی متیل فورفورال اضافه گردید. محتویات لوله‌ها به خوبی مخلوط شده و جذب آن‌ها با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتری در طول موج‌های ۲۸۴ و ۳۳۶ نانومتر خوانده شد. میزان هیدروکسی متیل فورفورال با استفاده از رابطه زیر (۱) محاسبه گردید [۱۰].

$$\text{HMF} = (A_{284} - A_{336}) \times 149.7 \times 5 \times (D/W) \quad \text{رابطه ۱}$$

A_{284} میزان جذب نمونه کارامل در طول موج ۲۸۴ نانومتر و A_{336} میزان جذب آن در طول موج ۳۳۶ نانومتر است. همچنین ۱۴۹/۷ ضریب تبدیل جذب به غلظت، D ضریب رقت و W وزن کارامل می‌باشد.

۴-۵- تعیین ظرفیت آنتی‌اکسیدانی با استفاده از آزمون DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl)

به منظور بررسی ظرفیت آنتی‌اکسیدانی نمونه‌ها، مقدار ۱۰ میلی‌لیتر از محلول کارامل با ۴۰ میلی‌لیتر اتانول ۸۰٪ مخلوط و به مدت یک ساعت در شرایط هم‌زدن مداوم قرار گرفت. سپس محلول حاصل صاف گردید. مقدار ۰/۵ میلی‌لیتر از محلول صاف‌شده با ۳/۵ میلی‌لیتر محلول DPPH ۰/۰۰۰۴٪ از معرف DPPH مخلوط و با متانول به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد. محلول تهیه‌شده به مدت ۳۰ دقیقه در محیط تاریک نگهداری شد. پس از پایان زمان واکنش، جذب محلول در طول موج ۵۱۷ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد. برای این منظور، ابتدا دستگاه با متانول کالیبره شد، سپس جذب محلول DPPH (به عنوان شاهد) اندازه‌گیری و در نهایت جذب نمونه اتانولی کارامل ثبت گردید [۱۱].

میزان ظرفیت آنتی‌اکسیدانی با استفاده از رابطه زیر (۲) محاسبه شد:

$$\text{DPPH} = (\text{جذب نمونه شاهد} - \text{جذب نمونه شاهد} + \text{میزان جذب نمونه اتانولی کارامل}) \quad \text{رابطه ۲}$$

^۱ Hydroxymethylfurfural (HMF)

^۲ Furfural

۲-۶- تعیین میزان پلی فنول‌ها

برای اندازه‌گیری میزان پلی فنول‌های کارامل تولیدی، از معرف فولین سیوکالتیو^۱ استفاده شد. ۱۰ میلی‌لیتر از معرف فولین سیوکالتیو به داخل بالن ژوژه ۱۰۰ میلی‌لیتری منتقل گردید و با آب مقطر به حجم رسانده شد. همچنین ۷/۵ گرم کربنات سدیم در آب مقطر حل شده و به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد. در مرحله بعد ۵ میلی‌لیتر از کارامل تولیدی به ۵۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر اضافه شد تا رقیق گردد. سپس ۱۰ میلی‌لیتر از عصاره رقیق شده به ۱۰ میلی‌لیتر الکل ۹۶ درصد اضافه گردید. از محلول حاصل یک میلی‌لیتر به ۱/۵ میلی‌لیتر معرف فولین سیوکالتیو اضافه گردید و ۱۰ دقیقه به آن زمان داده شد. در مرحله بعد ۱/۵ میلی‌لیتر بی کربنات سدیم به آن اضافه شد و به مدت ۳۰ دقیقه در محیطی تاریک نگهداری شد و در نهایت جذب محلول حاصل با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتری در طول موج ۷۶۵ نانومتر تعیین و یادداشت گردید. برای اندازه‌گیری ترکیب و پروفایل پلی فنول‌های موجود در نمونه کارامل نیز از دستگاه HPLC (Young lin Acme 9000, South Korea) استفاده شد [۱۲].

۲-۷- ارزیابی پارامترهای رنگی

سه پارامتر L^* ، a^* و b^* توسط رنگ‌سنج لایواندا (Konica Minolta- CR400, Japan) اندازه‌گیری شد. L^* معرف میزان روشنی نمونه و دامنه آن از صفر شاخص سیاه (خالص) تا ۱۰۰ سفید (خالص) متغیر است. شاخص a^* میزان نزدیکی رنگ نمونه به سبز و قرمز را نشان می‌دهد و دامنه آن از ۱۲۰- سبز (خالص) تا ۱۲۰+ قرمز (خالص) متغیر است. شاخص b^* میزان نزدیکی رنگ نمونه به آبی و زرد را نشان می‌دهد و دامنه آن از ۱۲۰- آبی (خالص) تا ۱۲۰+ زرد (خالص) متغیر است. مقدار کروما، شاخص E (تغییرات کلی رنگ) و زاویه رنگ به ترتیب با روابط ۳، ۴ و ۵ محاسبه گردید [۱].

$$\begin{aligned} \text{رابطه ۳} & \quad (a^2 + b^2)^{1/2} = \text{شاخص کروما} \\ \text{رابطه ۴} & \quad (L^2 + a^2 + b^2)^{1/2} = \text{تغییرات کلی رنگ} \\ \text{رابطه ۵} & \quad \tan^{-1} b^*/a^* = \text{زاویه رنگ} \end{aligned}$$

۲-۸- اندازه‌گیری ویسکوزیته

ویسکوزیته ظاهری کارامل پس از اختلاط با آب داغ توسط دستگاه ویسکومتر بروکفیلد (DV-III Ultra) در دمای ۸۰ درجه سلسیوس اندازه‌گیری شد. بعد از آزمایشات مقدماتی اسپیندل شماره ۴-۱۸ به عنوان مناسب‌ترین اسپیندل و ۲۴۰ دور در دقیقه به عنوان سرعت چرخشی مورد نظر انتخاب شد [۱۳].

۲-۹- ارزیابی حسی کارامل تولیدی

ارزیابی حسی برای صفات بو، طعم، قابلیت جوندگی (تردی، نرمی و چسبندگی)، شیرینی و رنگ ظاهری توسط ۵ نفر داور آموزش دیده و با استفاده از تست هدونیک ۵ نقطه‌ای انجام شد. نمره ۱ برای کیفیت خیلی بد، ۲ برای بد، ۳ کیفیت متوسط، ۴ برای کیفیت خوب و ۵ برای کیفیت عالی در نظر گرفته شد [۱۴].

¹ Folin-Ciocalteu

۱۱-۲- آنالیز آماری

برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از آنالیز واریانس دو طرفه ANOVA به منظور ارزیابی اختلاف درون و بین عامل‌ها با استفاده از نرم افزار تحلیل آماری SAS ۹.۱ استفاده شد. کلیه آنالیزها در سطح معنی‌داری ۱ درصد ($P_{value} < 0.01$) انجام شد. کلیه نمودارها با نرم افزار Excel 2016 رسم شدند.

۳- نتایج و بحث

۱-۳- شاخص قهوه‌ای شدن

در پژوهش حاضر، تاثیر روش‌های مختلف تولید بر میزان شاخص قهوه‌ای شدن کارامل فروکتوز مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که از شکل ۱ مشخص است که روش‌های مختلف تولید کارامل، تاثیر معنی‌داری بر شاخص قهوه‌ای شدن آن داشتند ($P_{value} < 0.01$). شاخص قهوه‌ای شدن نمونه شاهد برابر با ۰/۲۵۶ بوده و به طور معنی‌داری از سایر نمونه‌های کارامل بیشتر بود و پس از آن نمونه کارامل تولید شده به روش اول که دارای ۸۴/۰۶٪ فروکتوز + ۷/۱۰٪ آمونیاک + ۸/۸۴٪ اسید سولفوریک بود، شاخص قهوه‌ای شدن بیشتری نسبت به سه نمونه کارامل دیگر داشت. کمترین شاخص قهوه‌ای شدن مربوط به نمونه کارامل تهیه شده به روش دوم (دارای ۷۹/۳۰۱٪ فروکتوز + ۹/۳۵٪ آمونیاک + ۱۱/۶۳٪ اسید سولفوریک) بود. با توجه به نتایج کسب شده می‌توان گفت که با افزایش آمونیاک و اسید سولفوریک، میزان شاخص قهوه‌ای شدن نمونه‌های کارامل در مقایسه با نمونه شاهد روند کاهشی داشته است. در حالی که نمونه‌های کارامل حاوی میزان فروکتوز بالا شاخص قهوه‌ای شدن مناسبی را نشان دادند.

دلیل کاهش شاخص قهوه‌ای شدن در نمونه‌های دارای غلظت آمونیاک و اسید سولفوریک بیشتر را می‌توان به تاثیر اسید سولفوریک و اسیدی‌تر شدن محیط نسبت داد. تحقیقات نشان داده‌اند که ایجاد رنگ قهوه‌ای در محصولات حاصل از کاراملیزاسیون^۱ در حضور مونوساکاریدها و در pHهای قلیایی نسبت به pHهای اسیدی بیشتر رخ می‌دهد [۱۵]. در شرایط قلیایی، واکنش‌های تجزیه دی‌کربونیل و رتروآلدولیزاسیون^۲ به میزان بیشتری اتفاق می‌افتد و در نتیجه ترکیبات عامل رنگ و آروما بیشتر به وجود می‌آیند [۱۶]. از طرفی واکنش‌های انولیزاسیون^۳ موجب تجزیه قندها می‌شوند. این واکنش‌ها در شرایط اسیدی به کندی رخ می‌دهد. در واقع قلیا نسبت به اسید کاتالیزور موثرتری است [۱۷].

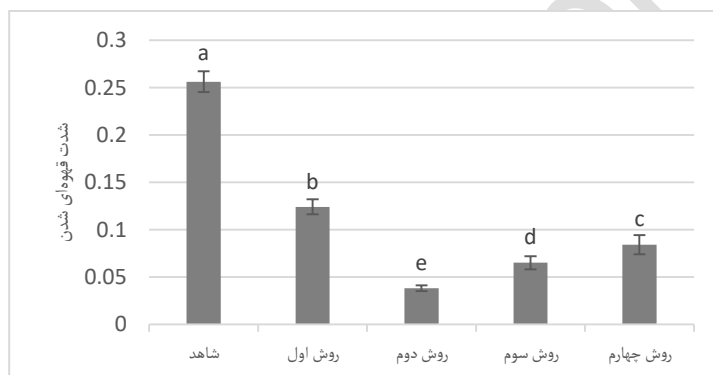
صباغ زاده و همکاران در سال ۱۳۹۹، تاثیر شرایط کاراملیزاسیون و نوع قند مورد استفاده بر شدت قهوه‌ای شدن کارامل را بررسی نمودند و بیان کردند که کمترین میزان جذب نوری مربوط به کارامل حاصل از ساکاروز در pH=۴ و بیشترین میزان جذب نور نیز مربوط به کارامل فروکتوز در pH=۱۰ بود. همچنین کارامل فروکتوز تهیه شده در pH=۱۰، در مقایسه با pH=۷ افزایش چشمگیری در میزان قهوه‌ای شدن نشان داد. نتایج این محققین حاکی از آن بود که افزایش pH منجر به افزایش شاخص قهوه‌ای شدن کارامل فروکتوز می‌شود. همچنین کارامل ساکاروز در مقایسه با فروکتوز شاخص قهوه‌ای شدن کمتری را نشان داد [۳].

¹ Caramelization

² Retroaldolization

³ Enolization

در تحقیقی دیگر، Karseno و همکاران در سال ۲۰۱۸، تاثیر شرایط کاراملیزاسیون بر شدت قهوه‌ای شدن کارامل قند نارگیل را بررسی کردند و گزارش کردند که pH اولیه و دمای پایانی تأثیر قابل توجهی بر شدت قهوه‌ای شدن قند نارگیل گذاشتند. افزایش pH و دما منجر به افزایش بیشتر رنگ قهوه‌ای قند نارگیل شد [۱۲]. همچنین Jain و همکاران در سال ۲۰۱۷، شدت قهوه‌ای شدن مخلوط فروکتوز و پوره سیب زمینی در محلول هیدروکسید سدیم را بررسی کردند و تأثیر دما و زمان‌های مختلف حرارت دادن بر روی این مخلوط را ارزیابی نمودند و گزارش کردند که با افزایش دما و زمان حرارت‌دهی، شدت قهوه‌ای شدن افزایش پیدا کرد [۱۸]. علاوه بر این، Hwang و همکاران (۲۰۱۱)، گزارش کردند که در طی حرارت‌دهی در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس به مدت ۶۰ دقیقه، محصولات میلارد حاصل از سیستم مدل فروکتوز نسبت به سیستم مدل گلوکز، شدت قهوه‌ای شدن بیشتری را از خود نشان دادند [۱۹]. Lertittikul و همکاران (۲۰۰۷)، بیان کردند که تفاوت در میزان قهوه‌ای شدن می‌تواند به علت تفاوت در pH اولیه نمونه‌ها باشد [۲۰]. Coca و همکاران در سال ۲۰۰۴ گزارش کردند که محصولات تجزیه‌ای با طول زنجیره کربنی کمتر از ۶ اتم کربن توانستند به ترکیبات با وزن مولکولی بالا تبدیل شوند که این امر به ایجاد رنگ در طی واکنش‌های تجزیه‌ی قلیایی مرتبط بود [۲۱].



شکل ۱) اثر روش‌های مختلف بر شدت قهوه‌ای شدن کارامل تولیدی (روش اول: ۸۴/۰۶٪ فروکتوز + ۷/۱۰٪ آمونیاک + ۸/۸۴٪ اسید سولفوریک، ۹۰ دقیقه؛ روش دوم: ۷۹/۰۱٪ فروکتوز + ۹/۳۵٪ آمونیاک + ۱۱/۶۳٪ اسید سولفوریک، ۹۰ دقیقه؛ روش سوم: ۹۱/۸۵٪ فروکتوز + ۳/۳۴٪ آمونیاک + ۴/۸۳٪ اسید سولفوریک، ۴ ساعت؛ روش چهارم: ۸۸/۹۳٪ فروکتوز + ۴/۵۳٪ آمونیاک + ۶/۵۴٪ اسید سولفوریک، ۴ ساعت)

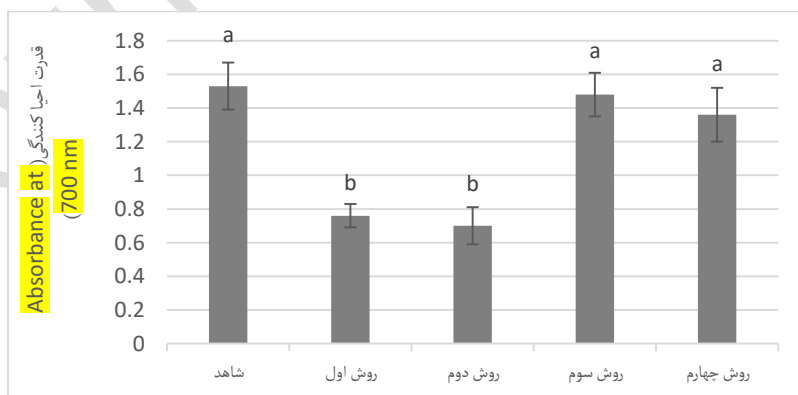
۲-۳- قدرت احیاکنندگی

نتایج مربوط به ارزیابی قدرت احیاکنندگی کارامل فروکتوز تولید شده به روش‌های مختلف در شکل ۲ نشان داده شده است. قدرت احیاکنندگی نمونه کارامل شاهد و کارامل‌های تهیه شده به روش سوم و چهارم تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نداشتند ($P_{value} > 0.01$). به طوری که میزان قدرت احیاکنندگی نمونه‌های کارامل شاهد، کارامل تهیه شده به روش سوم (حاوی ۹۱/۸۵٪ فروکتوز + ۳/۳۴٪ آمونیاک + ۴/۸۳٪ اسید سولفوریک) و کارامل تهیه شده به روش چهارم (حاوی ۸۸/۹۳٪ فروکتوز + ۴/۵۳٪ آمونیاک + ۶/۵۴٪ اسید سولفوریک) به ترتیب ۱/۵۳، ۱/۴۸ و ۱/۳۶ تعیین شد. در حالی که با افزایش درصد آمونیاک و اسید سولفوریک و دو برابر شدن مقدار آن‌ها، قدرت احیاکنندگی نمونه‌های کارامل فروکتوز به طور معنی‌داری کاهش پیدا کرد ($P_{value} < 0.01$). به گونه‌ای که میزان قدرت احیاکنندگی در نمونه‌های کارامل حاوی ۸۴/۰۶٪ فروکتوز + ۷/۱۰٪ آمونیاک + ۸/۸۴٪ اسید سولفوریک و کارامل حاوی ۷۹/۰۱٪ فروکتوز + ۹/۳۵٪ آمونیاک + ۱۱/۶۳٪ اسید سولفوریک به ترتیب ۰/۷۶ و ۰/۷ بود.

علت پایین بودن قدرت احیاکنندگی نمونه‌های کارامل تهیه شده به روش اول و دوم ممکن است به میزان اسید سولفوریک بالاتر این نمونه‌ها و اسیدی‌تر بودن محیط مربوط باشد. با افزایش pH، قدرت احیاکنندگی کارامل در تمامی قندها افزایش پیدا می‌کند [۳]. علت این امر می‌تواند این باشد که در محلول‌های قلیایی، آنیون‌های اندیول می‌توانند از طریق آنولیزاسیون توسط یون هیدروکسید تولید شوند. این ترکیبات به عنوان ترکیبات حد واسط واکنش ایزومریزاسیون مونوساکاریدها در نظر گرفته می‌شوند که در شرایط قلیایی به وجود می‌آیند و دارای هیدروژن‌دهندگی بالاتری هستند [۲۱].

در پژوهشی مشابه، صباغ زاده و همکاران (۱۳۹۹)، تاثیر نوع قند و pH بر میزان احیاکنندگی کارامل را بررسی کردند و گزارش دادند که در بین ۴ قند مورد آزمایش یعنی گلوکز، فروکتوز، مالتوز و ساکاروز، بیشترین قدرت احیاکنندگی مربوط به قند فروکتوز در pH قلیایی برابر ۱۰ بود. آن‌ها میزان قدرت احیاکنندگی قند فروکتوز در این pH را معادل ۰/۵۷۸ برآورد کردند. همچنین کمترین میزان قدرت احیاکنندگی نیز مربوط به محلول ساکاروز در pH خنثی مشاهده شد [۳]. علاوه بر آن، Benjakul و همکاران (۲۰۰۵) در بررسی قدرت احیاکنندگی کارامل حاصل از قندهای مختلف بیان کردند که قدرت احیاکنندگی کارامل حاصل از فروکتوز نسبت به کارامل حاصل از گلوکز کمی بیشتر بود. هم چنین این محققین عنوان کردند که قدرت احیاکنندگی قندها در محلول‌های قلیایی بیشتر از محلول‌های خنثی بود [۱۵].

با توجه به اینکه در پژوهش حاضر، زمان حرارت‌دهی نمونه‌های کارامل نیز با هم متفاوت بود و دو نمونه کارامل تهیه شده به روش اول و دوم به مدت ۹۰ دقیقه در دمای ۱۰۰ درجه و نمونه‌های کارامل تهیه شده به روش سوم و چهارم به مدت ۴ ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس حرارت دیده بودند، می‌توان اذعان نمود که زمان حرارت‌دهی نیز بر میزان قدرت احیاکنندگی قند موثر بوده است. به طوری که با افزایش زمان حرارت‌دهی شاخص احیاکنندگی قند فروکتوز افزایش پیدا کرده است. در همین راستا، Hu و همکاران (۲۰۱۶)، بیان کردند که ترکیب چند مونوساکارید با سولفوریک اسید، بعد از حرارت‌دهی در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۲ ساعت، قدرت احیاکنندگی از خود نشان داد [۲۲]. در مطالعه‌ای دیگر، Lee و Lee در سال ۱۹۹۷ گزارش کردند که کارامل حاصل از ساکاروز تهیه شده در pH برابر ۴ که در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۹۰ دقیقه حرارت دیده بود قدرت احیاکنندگی داشت [۲۳].



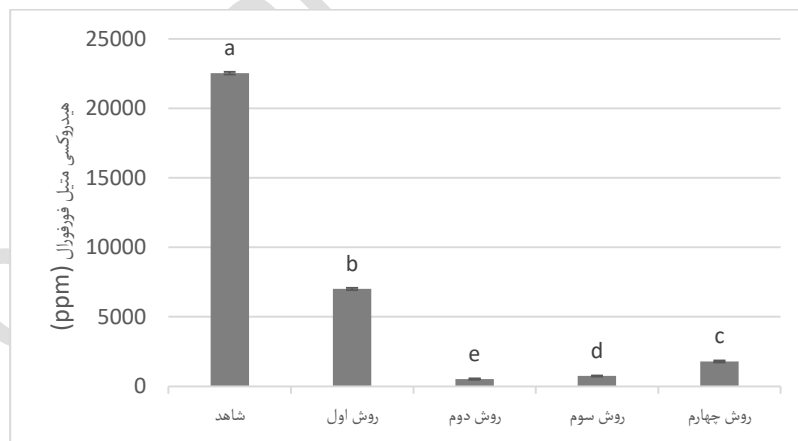
شکل ۲) اثر روش‌های مختلف بر قدرت احیاکنندگی کارامل تولیدی (روش اول: ۸۴/۰۶٪ فروکتوز + ۷/۱۰٪ آمونیاک + ۸/۸۴٪ اسید سولفوریک، ۹۰ دقیقه؛ روش دوم: ۷۹/۰۱٪ فروکتوز + ۹/۳۵٪ آمونیاک + ۱۱/۶۳٪ اسید سولفوریک، ۹۰ دقیقه؛ روش سوم: ۹۱/۸۵٪ فروکتوز + ۳/۳۴٪ آمونیاک + ۴/۸۳٪ اسید سولفوریک، ۴ ساعت؛ روش چهارم: ۸۸/۹۳٪ فروکتوز + ۴/۵۳٪ آمونیاک + ۶/۵۴٪ اسید سولفوریک، ۴ ساعت)

۳-۳- هیدروکسی متیل فورفورال

هیدروکسی متیل فورفورال در واکنش میلارد و همچنین در طی کاراملیزاسیون تشکیل می‌شود و در انواع غذاها و نوشیدنی‌ها یافت می‌شود [۲۴]. تحقیقات نشان دادند که فروکتوز در مقایسه با سایر مونوساکاریدها واسطه هیدروکسی متیل فورفورال بیشتری تولید می‌کند و به توسعه رنگ قهوه‌ای به خاطر وجود یک گروه فروکتوفورانوزیل^۱ واکنش‌پذیر کمک می‌کند [۲۵].

نتایج مربوط به بررسی میزان هیدروکسی متیل فورفورال نمونه‌های کارامل فروکتوز تولید شده به چهار روش مختلف در شکل ۳ نشان داده شده است. نمونه‌های کارامل تولید شده به روش‌های مختلف از نظر میزان هیدروکسی متیل فورفورال تفاوت معنی‌داری با یکدیگر داشتند ($P_{value} < 0.01$). میزان هیدروکسی متیل فورفورال نمونه‌های شاهد و کارامل‌های تهیه شده به روش اول، دوم، سوم و چهارم به ترتیب ۲۲۵۲۶، ۷۰۰۶/۳، ۵۲۶/۴، ۷۴۳/۳ و ۱۷۷۹/۷ میلی گرم در هر کیلوگرم (ppm) برآورد شد. نتایج این بررسی حاکی از آن بود که نمونه کارامل ساده (شاهد) که فاقد آمونیاک و اسید سولفوریک است به طور معنی‌داری میزان هیدروکسی متیل فورفورال بیشتری نسبت به سایر نمونه‌های کارامل دارد ($P_{value} < 0.01$). اما با افزایش غلظت آمونیاک و اسید سولفوریک نمونه‌های کارامل میزان هیدروکسی متیل فورفورال آن کاهش پیدا کرد. به طوری که کمترین میزان هیدروکسی متیل فورفورال در نمونه کارامل تهیه شده به روش دوم (کارامل حاوی ۷۹/۰۱٪ فروکتوز + ۹/۳۵٪ آمونیاک + ۱۱/۶۳٪ اسید سولفوریک) مشاهده شد.

Licht و همکاران در سال ۱۹۹۲، مقدار ۵- هیدروکسی متیل فورفورال را در تمام نمونه‌های چهار دسته کارامل ارزیابی کردند و گزارش دادند که هر چهار نوع کارامل (I، II، III و IV) حاوی هیدروکسی متیل فورفورال بودند اما مقدار آن در هر دسته متغیر بود. آن‌ها میزان هیدروکسی متیل فورفورال در انواع مختلف رنگ کارامل را در محدوده ۷۰۰ تا ۳۳۷۰۰ میلی گرم/کیلوگرم (ppm) گزارش کردند. کارامل نوع III، کمترین غلظت هیدروکسی متیل فورفورال را داشت [۲۴].



شکل ۳ اثر روش‌های مختلف بر هیدروکسی متیل فورفورال کارامل تولیدی (روش اول: ۸۴/۰۶٪ فروکتوز + ۷/۱۰٪ آمونیاک + ۸/۸۴٪ اسید سولفوریک، ۹۰ دقیقه؛ روش دوم: ۷۹/۰۱٪ فروکتوز + ۹/۳۵٪ آمونیاک + ۱۱/۶۳٪ اسید سولفوریک، ۹۰ دقیقه؛ روش سوم: ۹۱/۸۵٪ فروکتوز + ۳/۳۴٪ آمونیاک + ۴/۸۳٪ اسید سولفوریک، ۴ ساعت؛ روش چهارم: ۸۸/۹۳٪ فروکتوز + ۴/۵۳٪ آمونیاک + ۶/۵۴٪ اسید سولفوریک، ۴ ساعت)

¹ Fructofuranose

۴-۳- فنول کل^۱

در پژوهش حاضر میزان فنول کل نمونه‌های کارامل فروکتوز تهیه شده به روش‌های مختلف تعیین شد و نتایج مربوط به آن در شکل ۴ آورده شده است. نمونه‌های کارامل از نظر میزان فنول کل تفاوت معنی‌داری با یکدیگر داشتند ($P_{value} < 0.01$). بیشترین میزان ترکیبات فنولی مربوط به نمونه کارامل شاهد با ۱۲۷۶/۷ میلی گرم اسید گالیک در هر گرم بود. پس از آن نمونه کارامل فروکتوز تهیه شده به روش اول که حاوی ۸۴/۰۶٪ فروکتوز + ۷/۱۰٪ آمونیاک + ۸/۸۴٪ اسید سولفوریک بود، ترکیبات فنولی برابر با ۱۱۵۱/۹ میلی گرم اسید گالیک/ گرم داشت که این میزان نسبت به نمونه‌های کارامل تهیه شده به سه روش دیگر بیشتر بود. کمترین میزان ترکیبات فنولی مربوط به نمونه کارامل تهیه شده به روش دوم (کارامل دارای ۷۹/۰۱٪ فروکتوز + ۹/۳۵٪ آمونیاک + ۱۱/۶۳٪ اسید سولفوریک) با میزان فنول کل ۶۲۶/۷ میلی گرم اسید گالیک/ گرم بود.

علاوه بر این نتایج ارزیابی پروفایل ترکیبات فنولی موجود در نمونه کارامل با استفاده از روش کروماتوگرافی مایع با فشار بالا (HPLC) نشان داد که ترکیبات فنولی شناسایی شده در نمونه کارامل شامل سیناپیک^۲ اسید (۱۲۶۲/۹ میلی گرم/ میلی لیتر)، پروتوکاتچوئیک^۳ اسید (۹۲۶/۱ میلی گرم/ میلی لیتر)، کاتچین^۴ (۵۰۱/۶ میلی گرم/ میلی لیتر) و الاگیک^۵ اسید (۲۲۰/۰۹ میلی گرم/ میلی لیتر) بود.

بین فنول کل با محصولات واکنش‌های کاراملیزاسیون و میلارد به ویژه ملانوئیدین ارتباط و همبستگی وجود دارد و با افزایش انجام واکنش میلارد و در نتیجه تولید ملانوئیدین، میزان فنول کل نیز افزایش می‌یابد [۲۶].

Karseno و همکاران در سال ۲۰۱۸، تاثیر pH و دما بر میزان فنول کارامل قند نارگیل را بررسی کردند و گزارش کردند که محتوای فنول کل قند نارگیل با افزایش pH و دما افزایش پیدا کرد. این امر نشان دهنده همبستگی بین واکنش میلارد با محتوای فنول کل بود. در pH و دمای بالا، سرعت واکنش میلارد افزایش می‌یابد و تشکیل محصولات حاصل از واکنش میلارد نیز افزایش می‌یابد. بنابراین، ممکن است محصولات حاصل از واکنش میلارد حاوی گروه‌های فنولی باشند و به همین دلیل میزان فنول کل با افزایش pH و دما و در نتیجه افزایش سرعت واکنش میلارد افزایش پیدا کرده باشد [۱۲]. در تحقیقی دیگر، El-Ghorab و همکاران (۲۰۱۰)، واکنش میلارد متشکل از سیستمین و گلوکز را در pH پایین و بالا بررسی کردند و نتیجه گرفتند که در شرایط قلیایی نسبت به شرایط خنثی و اسیدی میزان فنول کل بیشتری یافت شد [۲۷].

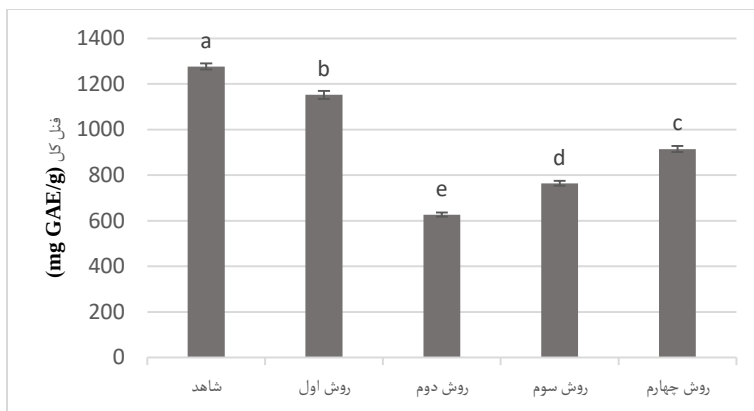
¹ Total Phenols

² -Sinapic

³ -Protocatechuic

⁴ -Catechin

⁵ -Ellagic



شکل ۴) اثر روش‌های مختلف بر ترکیبات فنلی کل کارامل تولیدی (روش اول: ۸۴/۰۶٪ فروکتوز + ۷/۱۰٪ آمونیاک + ۸/۸۴٪ اسید سولفوریک، ۹۰ دقیقه؛ روش دوم: ۷۹/۰۱٪ فروکتوز + ۹/۳۵٪ آمونیاک + ۱۱/۶۳٪ اسید سولفوریک، ۹۰ دقیقه؛ روش سوم: ۹۱/۸۵٪ فروکتوز + ۳/۳۴٪ آمونیاک + ۴/۸۳٪ اسید سولفوریک، ۴ ساعت؛ روش چهارم: ۸۸/۹۳٪ فروکتوز + ۴/۵۳٪ آمونیاک + ۶/۵۴٪ اسید سولفوریک، ۴ ساعت)

۳-۵- فعالیت آنتی‌اکسیدانی (DPPH)^۱

در پژوهش حاضر، میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی نمونه‌های کارامل فروکتوز تهیه شده به چهار روش مختلف، از طریق ارزیابی مهار رادیکال‌های آزاد DPPH ارزیابی شد که نتایج آن در شکل ۵ ارائه شده است. نتایج نشان داد که نمونه‌های کارامل تولید شده به روش‌های مختلف از نظر میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی تفاوت معنی‌داری با یکدیگر داشتند ($P_{value} < 0.01$). بیشترین فعالیت آنتی‌اکسیدانی مربوط به نمونه کارامل شاهد با ۷۰/۴۸ درصد و کمترین فعالیت آنتی‌اکسیدانی مربوط به نمونه کارامل تهیه شده به روش چهارم (کارامل حاوی ۸۸/۹۳٪ فروکتوز + ۴/۵۳٪ آمونیاک + ۶/۵۴٪ اسید سولفوریک) با ۲۹/۰۴ درصد بود. نمونه‌های کارامل روش اول و سوم (روش اول: ۸۴/۰۶٪ فروکتوز + ۷/۱۰٪ آمونیاک + ۸/۸۴٪ اسید سولفوریک؛ روش سوم: ۹۱/۸۵٪ فروکتوز + ۳/۳۴٪ آمونیاک + ۴/۸۳٪ اسید سولفوریک) از نظر فعالیت آنتی‌اکسیدانی تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نداشتند ($P_{value} > 0.01$) و هر دو نمونه ظرفیت آنتی‌اکسیدانی مناسبی را نشان دادند به طوری که فعالیت آنتی‌اکسیدانی نمونه‌های کارامل فروکتوز دارای ۸۴/۰۶٪ فروکتوز + ۷/۱۰٪ آمونیاک + ۸/۸۴٪ اسید سولفوریک و کارامل دارای ۹۱/۸۵٪ فروکتوز + ۳/۳۴٪ آمونیاک + ۴/۸۳٪ اسید سولفوریک به ترتیب ۴۹/۳۳ و ۴۸/۰۶ درصد بود. با توجه به نتایج کسب شده می‌توان گفت که نمونه‌های کاراملی که شربت فروکتوز بیشتری داشتند فعالیت آنتی‌اکسیدانی بالاتری را نشان دادند. اما با کاهش غلظت شربت فروکتوز میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی نیز کاهش پیدا کرد.

در زمینه بررسی میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی کارامل و تاثیر شرایط مختلف کاراملیزاسیون بر روی میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی تحقیقات زیادی صورت گرفته است. از جمله، صباغ زاده و همکاران در سال ۱۳۹۹، تاثیر نوع قند و pH بر روی میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی کارامل را بررسی کردند و گزارش کردند که بیشترین درصد مهار رادیکال DPPH مربوط به کارامل حاصل از فروکتوز در pH برابر ۱۰ و کمترین میزان آن هم مربوط به کارامل ساکاروز در pH برابر ۴ بود. آن‌ها میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی کارامل فروکتوز در pH برابر ۱۰ را ۶۴/۳ درصد گزارش کردند. با افزایش pH میزان ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کارامل تمامی قندهای مورد آزمایش افزایش پیدا کرد [۳].

¹ 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl

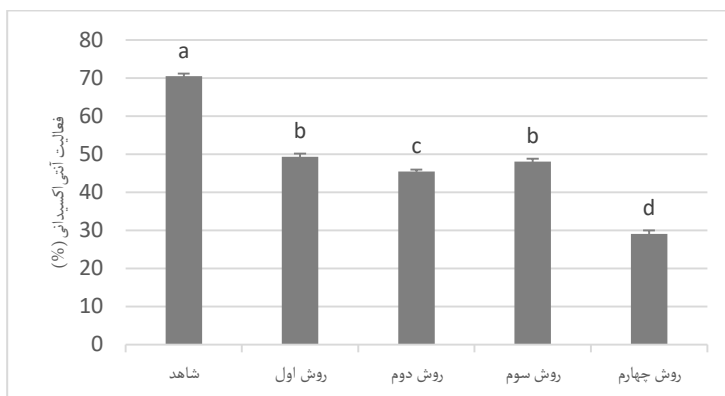
در تحقیقی دیگر، Dai و همکاران در سال ۲۰۲۱، ظرفیت آنتی اکسیدانی کل کارامل ساده و کارامل‌های اصلاح شده با اسیدهای کربوکسیلیک را به روش FRAP^۱ اندازه‌گیری کردند و گزارش دادند که ظرفیت آنتی اکسیدانی سه نمونه کارامل خام، مونو استر کارامل سوکسینات و مونو استر کارامل مالئات به ترتیب ۰/۰۷۵۵، ۰/۰۳۶۰ و ۰/۰۱۹۷ میلی مولار به دست آمد. نتایج نشان داد که ظرفیت آنتی اکسیدانی کل نمونه‌های کارامل اصلاح شده با اسید نسبت به کارامل خام کاهش یافته است. آن‌ها این نتیجه را به کاهش گروه‌های هیدروکسیل فنلی که دارای خواص آنتی اکسیدانی می‌باشند، نسبت دادند. اسیدهای کربوکسیلیک ظرفیت آنتی اکسیدانی مربوطه را ندارند [۵]. در مطالعه‌ای دیگر، Rahardjo و همکاران (۲۰۲۰)، فعالیت آنتی اکسیدانی عصاره متانولی کارامل عسل را به روش DPPH ارزیابی کردند و نشان دادند که کارامل عسل دارای فعالیت آنتی اکسیدانی هستند. این محققین گزارش دادند که با افزایش دمای حرارت‌دهی میزان فعالیت آنتی اکسیدانی و مهار رادیکال‌های آزاد DPPH افزایش پیدا کرد. این محققین میزان ظرفیت آنتی اکسیدانی سه نمونه کارامل روشن، متوسط و تیره حاصل از عسل را به ترتیب ۱۲/۸۱۶ درصد، ۲۹/۰۹۸ درصد و ۳۳/۵۳۳ درصد گزارش کردند [۲۸]. در پژوهشی دیگر، Karseno و همکاران در سال ۲۰۱۸، تأثیر دما و pH بر روی فعالیت آنتی اکسیدانی و مهار رادیکال‌های آزاد DPPH را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که بین pH و دمای با توانایی مهار رادیکال DPPH قند نارگیل ارتباط قابل توجهی وجود داشت. با افزایش pH و دما، فعالیت مهار رادیکال‌های آزاد DPPH قند نارگیل افزایش پیدا کرد [۱۲]. همچنین Echavarria و همکاران در سال ۲۰۱۳، گزارش کردند که در نتیجه واکنش بین D- فروکتوز و L-آسپاراژین محصولی تولید می‌شود که دارای فعالیت مهار رادیکال‌های آزاد DPPH است [۲۹]. در پژوهشی دیگر، Tsai و همکاران (۲۰۰۹)، چهار قند مونوساکارید و دی ساکارید را با غلظت‌های مختلف ۱ تا ۴۰ درصد، در pH‌های برابر ۳، ۷ و ۱۰، در دمای ۹۰ درجه سلسیوس به مدت زمان‌های مختلف صفر تا ۴۲ ساعت حرارت دادند. نتایج حاصل از ۲۴۰ نمونه نشان داد که کارامل‌های مونوساکارید با غلظت بالاتر نسبت به کارامل‌های حاصل از دی ساکاریدها ظرفیت آنتی اکسیدانی بهتری را در شرایط قلیایی تر نشان دادند [۳۰]. pH و دمای بالا باعث ایجاد واکنش قهوه‌ای شدن غیر آنزیمی یا میلارد می‌شود. با افزایش بیشتر دما و pH واکنش میلارد نیز افزایش پیدا کرده و در نتیجه این واکنش محصولات جانبی با فعالیت آنتی اکسیدانی زیاد تولید می‌شوند [۱۲].

Brenna و همکاران در سال ۲۰۰۹، فعالیت آنتی اکسیدانی برخی از نوشابه‌های حاوی کارامل، مانند نوشابه‌های کولا و چیتو را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که حتی اگر نوشابه‌های غیرالکلی نسبت به سایر نوشیدنی‌ها مانند چای، قهوه یا شکلات فعالیت آنتی اکسیدانی کمتری داشته باشند، اما ممکن است به ترکیب آنتی اکسیدان‌های رژیم غذایی کمک کنند [۳۱]. Chawla و همکاران (۲۰۰۹)، گزارش کردند که محصولات حاصل از واکنش میلارد، به ویژه ملانوئیدین‌ها، فعالیت آنتی اکسیدانی بالایی دارند و قابلیت از بین بردن رادیکال‌های آزاد اکسیژن یا فلزات شلاته کننده را دارا می‌باشند [۳۲]. Phongkanpai و همکاران در سال ۲۰۰۶، گزارش کردند که با افزایش زمان حرارت‌دهی و همچنین افزایش pH به pH‌های قلیایی، درصد مهار رادیکال DPPH و ظرفیت آنتی اکسیدانی کارامل فروکتوز و گلوکز افزایش پیدا کرد [۳۳]. Payet و همکاران در سال ۲۰۰۵، ظرفیت مهار رادیکال‌های آزاد DPPH هفت قند قهوه‌ای نیشکر را به دلیل محتوای پلی فنل و ترکیبات فرار آن‌ها مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که عصاره‌های شکر قهوه‌ای علیرغم غلظت کم ترکیبات فنلی و فرار، خاصیت آنتی اکسیدانی و مهار کنندگی رادیکال‌های آزاد DPPH بالایی داشتند [۳۴].

در تحقیقات پیشین گزارش شده است که میزان فعالیت آنتی اکسیدانی با شدت قهوه‌ای شدن همبستگی دارد و با افزایش شدت قهوه‌ای شدن، فعالیت آنتی اکسیدانی نیز افزایش می‌یابد [۱۲]. Amin و همکاران (۲۰۱۰) نیز نشان دادند که افزایش شدت قهوه‌ای شدن قند

¹ - Ferric Reducing Antioxidant Power

خرما منجر به افزایش فعالیت آنتی اکسیدانی آن شد [۳۵]. با بررسی نتایج حاصل از شاخص قهوه‌ای شدن و ظرفیت آنتی اکسیدانی نمونه‌های کارامل در پژوهش حاضر، مشاهده می‌گردد که نمونه شاهد که بیشترین شاخص قهوه‌ای شدن را داشت، بیشترین ظرفیت آنتی اکسیدانی را نیز از خود نشان داد. در بین نمونه‌های کارامل تهیه شده به چهار روش مختلف نیز، نمونه کارامل تهیه شده به روش اول بیشترین شاخص قهوه‌ای شدن و هم چنین فعالیت آنتی اکسیدانی را از خود نشان داد. بنابراین نتایج پژوهش حاضر نیز ارتباط مستقیم شدت قهوه‌ای شدن و فعالیت آنتی اکسیدانی کارامل را تایید می‌کند.



شکل ۵) اثر روش‌های مختلف بر فعالیت آنتی اکسیدانی کارامل تولیدی (روش اول: ۸۴/۰۶٪ فروکتوز + ۷/۱۰٪ آمونیاک + ۸/۸۴٪ اسید سولفوریک، ۹۰ دقیقه؛ روش دوم: ۷۹/۰۱٪ فروکتوز + ۹/۳۵٪ آمونیاک + ۱۱/۶۳٪ اسید سولفوریک، ۹۰ دقیقه؛ روش سوم: ۹۱/۸۵٪ فروکتوز + ۳/۳۴٪ آمونیاک + ۴/۸۳٪ اسید سولفوریک، ۴ ساعت؛ روش چهارم: ۸۸/۹۳٪ فروکتوز + ۴/۵۳٪ آمونیاک + ۶/۵۴٪ اسید سولفوریک، ۴ ساعت)

۹-۳- پارامترهای رنگی

نتایج مربوط به بررسی پارامترهای رنگی روشنایی (L^*)، قرمزی (a^*)، زردی (b^*)، شاخص کروما، زاویه رنگ و تغییرات کلی رنگ نمونه‌های کارامل فروکتوز تولید شده به چهار روش مختلف در جدول ۱ ارائه شده است. نمونه‌های کارامل تولید شده به روش‌های مختلف از نظر پارامترهای L^* ، a^* و b^* تفاوت معنی‌داری با یکدیگر داشتند ($P_{value} < 0.01$). بیشترین میزان روشنایی (۱۱/۹۷) مربوط به نمونه کارامل تهیه شده به روش دوم بود. در حالی که کمترین میزان شاخص L^* در نمونه کارامل تهیه شده به روش چهارم با شاخص L^* برابر ۲/۰۳ مشاهده شد. نتایج ارزیابی L^* بیانگر بالاتر بودن میزان این شاخص در نمونه‌های کارامل فروکتوز دارای غلظت آمونیاک و اسید سولفوریک بیشتر بود. همچنین نتایج ارزیابی قرمزی (a^*) نشان داد که نمونه کارامل تهیه شده به روش دوم که حاوی ۷۹/۰۱٪ فروکتوز + ۹/۳۵٪ آمونیاک + ۱۱/۶۳٪ اسید سولفوریک بود قرمزی بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها داشت و میزان شاخص a^* در این نمونه کارامل برابر با ۱۶/۸۷ بود. در حالی که نمونه کارامل شاهد کمترین قرمزی را با شاخص a^* برابر با ۰/۴۸ نشان داد. در بررسی شاخص زردی (b^*) نیز مشخص شد که نمونه کارامل تهیه شده به روش دوم با میزان شاخص b^* برابر با ۱۱/۹، بیشترین میزان این شاخص را به خود اختصاص داد. کمترین شاخص زردی نیز مربوط به نمونه کارامل شاهد با شاخص b^* برابر با ۱-۷۱ بود.

مقایسه نتایج ارزیابی پارامترهای رنگی L^* ، a^* و b^* با نتایج آزمون کروما و شاخص رنگ نمونه‌های کارامل نشان داد که در هر سه آزمون نمونه کارامل تهیه شده به روش دوم که حاوی ۷۹/۰۱٪ فروکتوز + ۹/۳۵٪ آمونیاک + ۱۱/۶۳٪ اسید سولفوریک بود، شاخص‌های رنگی بیشتری نسبت به سایر نمونه‌های کارامل داشت.

شاخص رنگ یک شاخص مهم برای ارزیابی رنگ کاراملی است. شاخص قرمزی (a^*) و شاخص زردی (b^*) نشانگر قدرت رنگ قرمز و رنگ زرد در کارامل می‌باشند. همچنین شاخص L^* میزان روشنایی و تاریکی را نشان می‌دهد و مقدار آن از ۰ تا ۱۰۰ است [۵]. در طول تشکیل کارامل، تخریب حرارتی قند منجر به تشکیل فورفورال، ۵-متیل فورفورال و هیدروکسی متیل فورفورال شده و در نتیجه، تولید این محصولات باعث افزایش تیرگی کارامل و کاهش شاخص L^* می‌شود [۳۶]. همچنین دمای بالا باعث کاهش وزن کارامل به دلیل دهیدراتاسیون مولکول‌های آب می‌شود. دمای بالاتر کاراملین بیشتر با وزن مولکولی بالا تولید می‌کند که تیره رنگ است و باعث کاهش مقدار a^* و b^* می‌شود [۲۸].

در تحقیقی مشابه، Dai و همکاران در سال ۲۰۲۱، شاخص‌های رنگ، قرمزی و زردی نمونه‌های کارامل خام یا ساده، کارامل حاوی سوکسینات مونواستر و مالئات کارامل مونواستر را اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان داد که میزان شاخص رنگ مونواستر کارامل سوکسینات در مقایسه با کارامل خام بسیار بیشتر بود یعنی استفاده از کربوکسیلیک اسید مونواستر سوکسینات منجر به بهبود دو برابری شاخص رنگ کارامل خام شد. اما میزان شاخص‌های قرمزی و زردی مونواستر کارامل سوکسینات در مقایسه با کارامل خام کاهش یافته بودند. بر عکس میزان شاخص رنگ مونواستر کارامل مالئات کمتر و شاخص‌های زردی و قرمزی آن بیشتر از کارامل خام بودند [۵]. در مطالعه‌ای دیگر، Rahardjo و همکاران (۲۰۲۰)، پارامترهای رنگی L^* ، a^* و b^* کارامل عسل را مورد بررسی قرار دادند. این محققین از شاخص L^* برای بررسی سطح روشنایی و تاریکی استفاده نمودند و گزارش دادند که میزان شاخص روشنایی یا L^* با افزایش دمای گرمایش کارامل کاهش پیدا کرده است. به طوری که نمونه‌های کارامل عسل تهیه شده در دماهای بالاتر شاخص L^* پایین‌تری داشتند و رنگ آن‌ها تیره‌تر بود. مقدار a^* و b^* نیز با افزایش دمای حرارت‌دهی کارامل کاهش پیدا کرد [۲۸]. Kocadagli (۲۰۱۹)، عنوان کرد که دهیدراتاسیون قندها باعث تولید چندین دئوکسیوزون فعال و مشتقات فوران و پیران پایدارتر می‌شود که برای تشکیل رنگ و طعم کارامل مهم هستند [۳۷].

نمونه‌های کارامل تولید شده به روش‌های مختلف از نظر میزان شاخص کروما تفاوت معنی‌داری با یکدیگر داشتند (جدول ۱) ($P_{value} < 0.01$). در بین نمونه‌های کارامل تهیه شده به روش‌های مختلف بیشترین میزان کروما (۲۱۲/۸۱) مربوط به نمونه کارامل دارای ۷۸/۳٪ فروکتوز + ۱۰/۲٪ آمونیاک + ۱۱/۵٪ اسید سولفوریک (تهیه شده به روش دوم) بود. همچنین کمترین میزان شاخص کروما مربوط به نمونه‌های شاهد و نمونه کارامل تهیه شده به روش چهارم (حاوی ۸۸/۵٪ فروکتوز + ۵٪ آمونیاک + ۶/۵٪ اسید سولفوریک) به ترتیب با مقادیر ۱/۵۳ و ۱/۵۹ بود. میزان شاخص کرومای نمونه‌های کارامل تهیه شده به روش اول و سوم نیز به ترتیب ۲۷/۷۴ و ۷/۸۵ برآورد شد.

با توجه به نتایج مشخص است که نمونه‌های کارامل تولید شده به روش‌های مختلف از نظر شاخص رنگ تفاوت معنی‌داری با یکدیگر داشتند ($P_{value} < 0.01$). همانند نتایج ارزیابی کروما، در ارزیابی تغییرات رنگ نیز، بیشترین میزان تغییرات رنگ (۲۸۴/۴۵) مربوط به نمونه کارامل تهیه شده به روش دوم (حاوی ۷۹/۰۱٪ فروکتوز + ۹/۳۵٪ آمونیاک + ۱۱/۶۳٪ اسید سولفوریک) بود. همچنین نمونه‌های کارامل شاهد با شاخص رنگ ۴/۲۷ و کارامل تهیه شده به روش چهارم (حاوی ۸۸/۹۳٪ فروکتوز + ۴/۵۳٪ آمونیاک +

۶/۵۴٪ اسید سولفوریک) با ۳/۶۵ کمترین میزان تغییرات رنگ را نشان دادند. میزان این شاخص در نمونه‌های کارامل تهیه شده به روش اول و کارامل تهیه شده به روش سوم به ترتیب برابر با ۳۵/۰۷ و ۱۱/۵۸ بود. نتایج کسب شده حاکی از آن بود نمونه‌های کارامل دارای غلظت آمونیاک و اسید سولفوریک بیشتر، تغییرات رنگی بالاتری در مقایسه با سایر نمونه‌های کارامل داشتند. همچنین در نمونه‌هایی که زمان حرارت‌دهی بیشتری داشتند (نمونه‌های کارامل تهیه شده به روش سوم و چهارم) میزان کروما کمتر از سایر نمونه‌ها بود.

میزان زاویه رنگ نمونه‌های کارامل فروکتوز تولید شده به روش‌های مختلف از نظر آماری تفاوت معنی‌داری با یکدیگر داشتند ($P_{value} < 0.01$). بیشترین زاویه رنگ (۰/۲۷۲) مربوط به نمونه کارامل تهیه شده به روش چهارم (حاوی ۸۸/۹۳٪ فروکتوز + ۴/۵۳٪ آمونیاک + ۶/۵۴٪ اسید سولفوریک) بود. همچنین کمترین میزان این شاخص مربوط به نمونه کارامل تهیه شده به روش دوم (حاوی ۷۹/۰۱٪ فروکتوز + ۹/۳۵٪ آمونیاک + ۱۱/۶۳٪ اسید سولفوریک)، با زاویه رنگ ۰/۳۹ بود. زاویه رنگ نمونه‌های کارامل شاهد، کارامل تهیه شده به روش اول و کارامل تهیه شده به روش سوم، به ترتیب ۰/۱۵۳، ۰/۱۳۲ و ۰/۲۵۱ برآورد شد. نتایج کسب شده حاکی از آن است که با افزایش غلظت آمونیاک و اسید سولفوریک در نمونه‌های کارامل فروکتوز، میزان زاویه رنگ به طور قابل توجهی کاهش پیدا کرده است.

در ارزیابی تغییرات کلی رنگ نیز، بیشترین میزان تغییرات رنگ (۲۸۴/۴۵) مربوط به نمونه کارامل تهیه شده به روش دوم بود. همچنین نمونه‌های کارامل شاهد و کارامل تهیه شده به روش چهارم، کمترین میزان تغییرات رنگ را نشان دادند. نتایج کسب شده از ارزیابی تغییرات رنگ نیز نتایج کروما را تایید کرد و نمونه‌های کارامل دارای غلظت آمونیاک و اسید سولفوریک بیشتر، تغییرات رنگی بالاتری در مقایسه با سایر نمونه‌های کارامل داشتند. نتایج ارزیابی زاویه رنگ‌های کارامل فروکتوز نشان داد که نمونه کارامل تهیه شده به روش چهارم دارای بیشترین زاویه رنگ بود. کمترین میزان این شاخص نیز مربوط به نمونه کارامل تهیه شده به روش دوم بود. نتایج کسب شده بیانگر ارتباط عکس بین زاویه رنگ و شاخص رنگ بود و نمونه‌هایی که زاویه رنگ بیشتری داشتند شاخص رنگ و کرومای کمتری را نشان دادند.

Rahardjo و همکاران (۲۰۲۰)، گزارش کردند که تغییرات رنگ کارامل عسل را ارزیابی کردند و گزارش دادند که با افزایش دمای حرارت‌دهی، شاخص رنگ (ΔE) کاهش پیدا کرد. با افزایش دمای حرارت‌دهی، کارامل عسل روشنایی خود را از دست داده و شاخص رنگ کم شد. این محققین گزارش دادند که کارامل سبک ساخته شده در دمای ۱۰۷ درجه سلسیوس در مقایسه با کارامل متوسط (۱۸۰-۱۸۲ درجه سلسیوس) رنگ روشن‌تری داشت. اما کارامل ساخته شده با دمای ۱۸۸ تا ۱۹۰ درجه سلسیوس تیره‌ترین رنگ را نشان داد. آن‌ها کاهش مقدار روشنایی و شاخص رنگ عسل را به تجمع رنگدانه قهوه‌ای با وزن مولکولی بالا نسبت دادند که از کاراملیزاسیون کارامل تیره ایجاد می‌شود [۲۸]. در پژوهشی دیگر، Kokeb و همکاران (۲۰۱۵)، تاثیر دما و زمان حرارت‌دهی بر روی شاخص رنگ کارامل قند ساده را بررسی کرده و نتیجه گرفتند که با افزایش زمان حرارت‌دهی تغییرات رنگ کارامل افزایش پیدا می‌کند. همچنین مشخص شد که هر چه دما بالاتر باشد تغییرات رنگ کارامل نیز بیشتر است [۱۳].

Gu و Chen در سال ۲۰۱۴، تاثیر استفاده از اسید آسکوربیک بر رنگ کارامل آمونیاکی را بررسی کردند و نشان دادند که با افزایش غلظت اسید آسکوربیک، شدت رنگ کارامل آمونیاکی روند کاهشی را نشان داد. نمونه شاهد که کارامل آمونیاکی حاصل از مخلوط گلوکز و آمونیاک در غیاب اسید آسکوربیک بود دارای pH قلیایی ضعیف بود. این قلیایی بودن به واکنش قهوه‌ای شدن کمک

می‌کند. هنگامی که غلظت اسید اسکوربیک در سیستم افزایش یافت، pH به تدریج کم شده و واکنش قهوه‌ای شدن مهار شد [۳۸]. در تحقیقی دیگر، Linner در سال ۱۹۷۰، برای تعیین شاخص رنگ یا قرمزی رنگ کارامل معادله‌ای بر اساس ارزیابی جذب نور با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتری در طول موج‌های ۵۱۰ و ۶۱۰ نانومتر ارائه داد و محدوده شاخص رنگ برای رنگ کارامل را ۳/۵ – ۷/۵ گزارش کرد [۳۹].

جدول (۱) مقایسه میانگین مقادیر پارامترهای رنگی L^* ، a^* ، b^* ، کروما، تغییرات کلی رنگ و زاویه رنگ نمونه‌های مختلف کارامل

نمونه‌ها	L^*	a^*	b^*	کروما	تغییرات کلی رنگ	زاویه رنگ
شاهد	$cd \pm 0.27$ ۲/۳۳	$e \pm 0.09$ ۰/۴۸	$d \pm 0.08$ -۱/۷۱	$d \pm 0.19$ ۱/۵۳	$d \pm 0.34$ ۴/۲۷	$c \pm 0.04$ ۰/۱۵۳
روش اول	$b \pm 0.32$ ۳/۸۳	$b \pm 0.11$ ۷/۳۵	$b \pm 0.07$ ۱/۲۱	$b \pm 0.28$ ۲۷/۷۴	$b \pm 0.39$ ۳۵/۰۷	$d \pm 0.08$ ۰/۱۳۲
روش دوم	$a \pm 0.24$ ۱۱/۹۷	$a \pm 0.14$ ۱۶/۸۷	$a \pm 0.14$ ۱۱/۹۰	$a \pm 0.47$ ۲۱۲/۸۱	$a \pm 0.61$ ۲۸۴/۴۵	$e \pm 0.03$ ۰/۰۳۹
روش سوم	$c \pm 0.19$ ۲/۷۴	$c \pm 0.07$ ۳/۹۶	$c \pm 0.07$ ۰/۱۹	$c \pm 0.39$ ۷/۸۵	$c \pm 0.49$ ۱۱/۵۸	$b \pm 0.05$ ۰/۲۵۱
روش چهارم	$d \pm 0.16$ ۲/۰۳	$d \pm 0.13$ ۰/۸۷	$d \pm 0.10$ -۱/۵۶	$d \pm 0.24$ ۱/۵۹	$d \pm 0.29$ ۳/۶۵	$a \pm 0.10$ ۰/۲۷۲

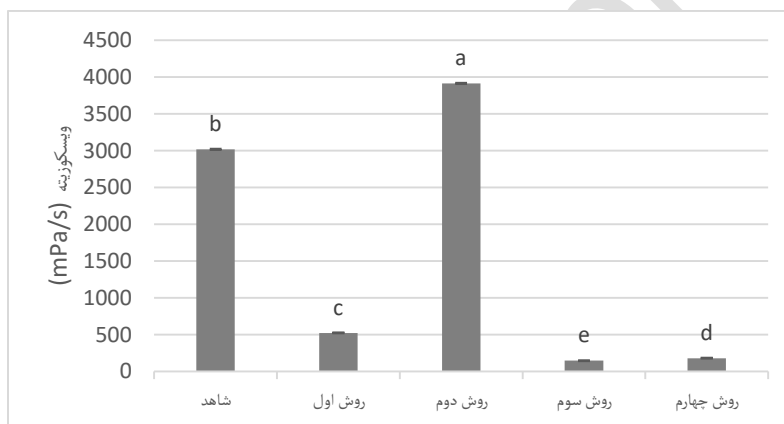
* نتایج به صورت میانگین $\pm$ انحراف معیار گزارش شده‌اند. حروف لاتین متفاوت بیانگر وجود اختلاف معنی‌دار بین مقادیر هر ستون در سطح اطمینان ۹۵٪ می‌باشد. (روش اول: ۸۴/۰۶٪ فروکتوز + ۷/۱۰٪ آمونیاک + ۸/۸۴٪ اسید سولفوریک، ۹۰ دقیقه؛ روش دوم: ۷۹/۰۱٪ فروکتوز + ۹/۳۵٪ آمونیاک + ۱۱/۶۳٪ اسید سولفوریک، ۹۰ دقیقه؛ روش سوم: ۹۱/۸۵٪ فروکتوز + ۳/۳۴٪ آمونیاک + ۴/۸۳٪ اسید سولفوریک، ۴ ساعت؛ روش چهارم: ۸۸/۹۳٪ فروکتوز + ۴/۵۳٪ آمونیاک + ۶/۵۴٪ اسید سولفوریک، ۴ ساعت)

۱۰-۳- ویسکوزیته

در پژوهش حاضر، میزان ویسکوزیته نمونه‌های کارامل فروکتوز تهیه شده به چهار روش مختلف ارزیابی شد که نتایج مربوط آن در شکل ۶ آورده شده است. نتایج نشان داد که نمونه‌های کارامل تولید شده به روش‌های مختلف از نظر میزان ویسکوزیته تفاوت معنی‌داری با یکدیگر داشتند ($P_{value} < 0.01$). به طوری که بیشترین ویسکوزیته مربوط به نمونه کارامل تهیه شده به روش دوم (حاوی ۷۹/۰۱٪ فروکتوز + ۹/۳۵٪ آمونیاک + ۱۱/۶۳٪ اسید سولفوریک) با مقدار ۳۹۱۲/۱ میلی پاسکال بود. همچنین نمونه کارامل تهیه شده به روش سوم (حاوی ۹۱/۸۵٪ فروکتوز + ۳/۳۴٪ آمونیاک + ۴/۸۳٪ اسید سولفوریک) کمترین میزان ویسکوزیته را با مقدار ویسکوزیته ۱۴۴/۵ میلی پاسکال نشان داد. میزان ویسکوزیته نمونه‌های کارامل تهیه شده به روش اول، چهارم و نمونه شاهد به ترتیب برابر با ۵۲۱/۶، ۱۷۸/۲ و ۳۰۱۷/۱ میلی پاسکال تعیین شد.

با توجه به اینکه فروکتوز به عنوان مونوساکارید کوچکتر در دمای پایین‌تری (حدود ۱۱۰ درجه سلسیوس) نسبت به ساکارز (حدود ۱۶۰ درجه سلسیوس) کاراملیزه می‌شود [۴۲]، و نیز محلول‌های فروکتوزی نسبت به ساکارزی دارای ویسکوزیته پایین‌تر، نقطه انتقال شیشه‌ای کمتر و حلالیت آب بیشتری هستند [۴۳]، انتظار می‌رود که کارامل تولید شده از شربت فروکتوز دارای مولکول‌های کوچک‌تر و در نتیجه ویسکوزیته پایین‌تری نسبت به کارامل حاصل از ساکارز باشد. همچنین، مطالعات رئولوژیک نشان داده‌اند که

کاهش آب با افزایش دما منجر به افزایش ویسکوزیته در کارامل‌های تولید شده از ساکارز می‌شود [۴۴] که تاییدی است بر تفاوت ساختاری و رفتاری این دو نوع کارامل است. افزایش زمان حرارت‌دهی منجر به پیشرفت واکنش‌های میلارد و کاراملیزاسیون می‌شود که ابتدا باعث تشکیل پلیمرهای سنگین‌تر و افزایش ویسکوزیته می‌گردد، اما مشابه با نتایج این پژوهش، با ادامه حرارت‌دهی ممکن است تخریب این پلیمرها اتفاق افتاده و ویسکوزیته کاهش یابد. همچنین تغییر در نسبت آمونیاک و اسید سولفوریک بر pH محیط واکنش تأثیر گذاشته و مسیر و سرعت واکنش‌های شیمیایی را دستخوش تغییر می‌کند که این موضوع به تولید محصولات با ساختار و وزن مولکولی متفاوت و در نتیجه تغییر در ویژگی‌های رئولوژیکی منجر می‌شود. این نتایج با یافته‌های پژوهش‌های قبلی هم‌راستا است که نشان می‌دهد ترکیب مواد اولیه و شرایط حرارتی به‌صورت هم‌زمان، کنترل‌کننده ویژگی‌های نهایی کارامل هستند [۴۰، ۴۱]. در پژوهشی مشابه، Kokeb و همکاران (۲۰۱۵)، تأثیر شرایط مختلف کاراملیزاسیون بر روی ویسکوزیته کارامل قند ساده را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که با افزایش دما و زمان حرارت‌دهی، ویسکوزیته کارامل مونوساکارید به طور بسیار سریعی کاهش پیدا کرد. گلوکز در دمای ۱۴۵ درجه سلسیوس و زمان تماس هفت ساعت به کمترین میزان ویسکوزیته رسید [۱۳].



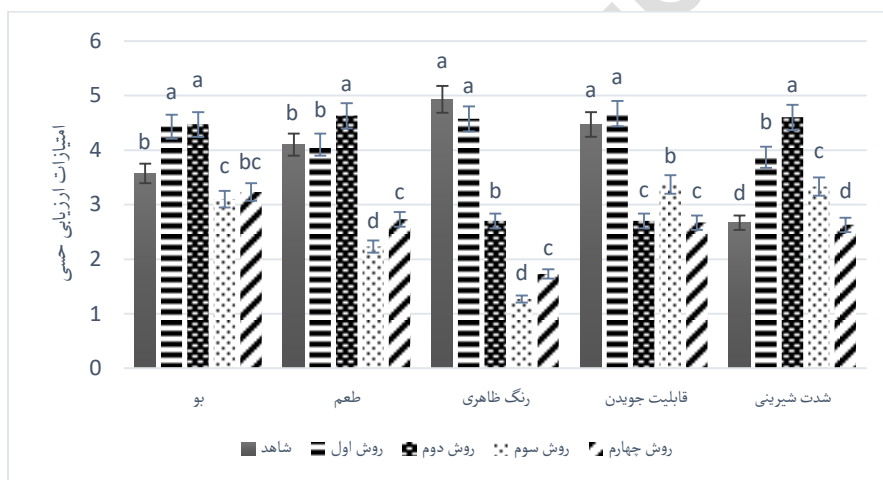
شکل ۶ اثر روش‌های مختلف بر ویسکوزیته کارامل تولیدی (روش اول: ۸۴/۰۶٪ فروکتوز + ۷/۱۰٪ آمونیاک + ۸/۸۴٪ اسید سولفوریک، ۹۰ دقیقه؛ روش دوم: ۷۹/۰۱٪ فروکتوز + ۹/۳۵٪ آمونیاک + ۱۱/۶۳٪ اسید سولفوریک، ۹۰ دقیقه؛ روش سوم: ۹۱/۸۵٪ فروکتوز + ۳/۳۴٪ آمونیاک + ۴/۸۳٪ اسید سولفوریک، ۴ ساعت؛ روش چهارم: ۸۸/۹۳٪ فروکتوز + ۴/۵۳٪ آمونیاک + ۶/۵۴٪ اسید سولفوریک، ۴ ساعت)

۱۱-۳- ارزیابی حسی نمونه‌های کارامل

در پژوهش حاضر، نمونه‌های مختلف کارامل از نظر ویژگی‌های حسی بو، رنگ، ظاهری، طعم، شدت شیرینی و قابلیت جویدن توسط ۵ نفر ارزیاب آموزش دیده مورد ارزیابی قرار گرفتند و بر اساس تست هدونیک ۵ نقطه‌ای به این نمونه‌ها امتیاز داده شد. نمره ۱ برای کیفیت خیلی بد، ۲ برای بد، ۳ کیفیت متوسط، ۴ برای کیفیت خوب و ۵ برای کیفیت عالی در نظر گرفته شد. نتایج مربوط به ارزیابی حسی نمونه‌های کارامل فروکتوز در شکل ۷ نشان داده شده است. ارزیاب‌ها به عطر و بوی حاصل از نمونه‌های کارامل تهیه شده به روش اول (کارامل حاوی ۸۴/۰۶٪ فروکتوز + ۷/۱۰٪ آمونیاک + ۸/۸۴٪ اسید سولفوریک و کارامل تهیه شده به روش دوم (کارامل حاوی ۷۹/۰۱٪ فروکتوز + ۹/۳۵٪ آمونیاک + ۱۱/۶۳٪ اسید سولفوریک) امتیاز بیشتری را اختصاص دادند و این دو نمونه کارامل بیشتر مورد پسند ارزیاب‌ها قرار گرفتند. در حالی که کمترین امتیاز عطر و بو به نمونه تهیه شده به روش سوم (کارامل حاوی

۹۱/۸۵٪ فروکتوز + ۳/۳۴٪ آمونیاک + ۴/۸۳٪ اسید سولفوریک) تعلق گرفت. از نظر ویژگی طعم، نمونه کارامل حاوی ۷۹/۰۱٪ فروکتوز + ۹/۳۵٪ آمونیاک + ۱۱/۶۳٪ اسید سولفوریک (کارامل تهیه شده به روش دوم) با میانگین امتیاز ۴/۶۳ بیشترین امتیاز را از ارزیاب‌ها دریافت کرد. در حالی که کمترین امتیاز طعم (۲/۳۳) به نمونه کارامل تهیه شده به روش سوم داده شد. از لحاظ رنگ ظاهری، نمونه‌های کارامل شاهد و کارامل تهیه شده به روش اول به ترتیب با میانگین امتیاز ۴/۹۳ و ۴/۵۷ بیشترین امتیاز را داشتند. اما نمونه کارامل تهیه شده به روش سوم با میانگین امتیاز ۱/۲۷ کمترین امتیاز را دریافت نمود.

نتایج بررسی ویژگی شدت شیرینی نیز نشان داد که نمونه کارامل تهیه شده به روش دوم نسبت به سایر نمونه‌ها شیرین‌تر بود و بیشتر مورد پسند ارزیاب‌ها قرار گرفت. در حالی که نمونه کارامل تهیه شده به روش چهارم کمترین شیرینی را نسبت به سایر نمونه‌های کارامل داشت و میانگین امتیاز ۲/۶۳ را از ارزیاب‌ها دریافت نمود. نمونه‌های مختلف کارامل فروکتوز از نظر قابلیت جویدن نیز مورد ارزیابی قرار گرفتند و نتایج نشان داد که نمونه‌های شاهد و نمونه کارامل تهیه شده به روش اول به ترتیب با میانگین امتیاز ۴/۴۷ و ۴/۶۷ قابلیت جویدن بهتری داشتند و بیشتر مورد پسند ارزیاب‌ها قرار گرفتند. کمترین امتیاز قابلیت جویدن به نمونه کارامل تهیه شده به روش چهارم تعلق گرفت.



شکل ۷) اثر روش‌های مختلف بر خصوصیات آزمون ارزیابی حسی کارامل تولیدی (روش اول: ۸۴/۰۶٪ فروکتوز + ۷/۱۰٪ آمونیاک + ۸/۸۴٪ اسید سولفوریک، ۹۰ دقیقه؛ روش دوم: ۷۹/۰۱٪ فروکتوز + ۹/۳۵٪ آمونیاک + ۱۱/۶۳٪ اسید سولفوریک، ۹۰ دقیقه؛ روش سوم: ۹۱/۸۵٪ فروکتوز + ۳/۳۴٪ آمونیاک + ۴/۸۳٪ اسید سولفوریک، ۴ ساعت؛ روش چهارم: ۸۸/۹۳٪ فروکتوز + ۴/۵۳٪ آمونیاک + ۶/۵۴٪ اسید سولفوریک، ۴ ساعت)

۴- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از پژوهش حاضر حاکی از آن بود که نمونه‌های کارامل فروکتوز تهیه شده به چهار روش مختلف از نظر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، رئولوژیکی و حسی با یکدیگر تفاوت داشتند. نتایج بیانگر این بود که شاخص قهوه‌ای شدن نمونه کارامل شاهد و پس از آن نمونه کارامل فروکتوز تهیه شده به روش اول از سایر نمونه‌های کارامل بیشتر بود. از نظر میزان هیدروکسی متیل فورفورال، نمونه کارامل شاهد که فاقد آمونیاک و اسید سولفوریک بود، میزان هیدروکسی متیل فورفورال بیشتری داشت. همچنین بیشترین میزان

ترکیبات فنولی در نمونه‌های کارامل شاهد و کارامل فروکتوز تهیه شده به روش اول مشاهده شد. ترکیبات فنولی شناسایی شده در نمونه کارامل شامل سیناپیک اسید، پروتوکاتچوئیک اسید، کاتچین و الاگیک اسید بود. بیشترین فعالیت آنتی‌اکسیدانی نیز مربوط به نمونه کارامل شاهد بود. ارزیابی پارامترهای رنگی نیز حاکی از آن بود که بیشترین میزان کروما یا اشباعیت (SI) مربوط به نمونه کارامل تهیه شده به روش دوم، بیشترین میزان تغییرات کلی رنگ (ΔE) مربوط به نمونه کارامل تهیه شده به روش دوم و بیشترین زاویه رنگ یا زاویه هيو (Hue) مربوط به نمونه کارامل تهیه شده به روش چهارم بود. همچنین بیشترین میزان شاخص‌های L^* یا روشنایی، a^* یا قرمزی، b^* یا زردی در نمونه کارامل فروکتوز تهیه شده به روش دوم مشاهده گردید. نمونه کارامل فروکتوز تهیه شده به روش دوم، بیشترین ویسکوزیته را داشت. نتایج ارزیابی حسی نشان داد که ارزیاب‌ها به عطر و بوی حاصل از نمونه‌های کارامل تهیه شده به روش اول و دوم امتیاز بیشتری را اختصاص دادند. از نظر ویژگی طعم نیز کارامل تهیه شده به روش دوم بالاترین امتیاز را از ارزیاب‌ها دریافت کرد. نمونه‌های کارامل شاهد و کارامل تهیه شده به روش اول بیشترین امتیاز از نظر رنگ ظاهری را داشتند. همچنین نمونه کارامل تهیه شده به روش دوم نسبت به سایر نمونه‌ها شیرین‌تر بود. نمونه‌های شاهد و نمونه کارامل تهیه شده به روش اول قابلیت جویدن بهتری داشتند و بیشتر مورد پسند ارزیاب‌ها قرار گرفتند.

۵- منابع

۱. باقری، ه؛ کاشانی نژاد، م؛ ضیایی فر، ا؛ اعلمی، م. (۱۳۹۵). ارزیابی پارامترهای رنگی، رطوبت و میزان انرژی مصرفی طی پرشته کردن مغز بادام زمینی با استفاده از هوای داغ. فناوری‌های جدید در صنعت غذا (فناوری‌های نوین غذایی)، ۳(۱۱)، ۵۹-۷۱.
۲. کرامت، ج؛ ملک، س. (۱۳۸۰) جدا کردن رنگ کاراملی از ملاس چغندر قند و بررسی ویژگی‌ها و کاربرد آن در صنایع غذایی، علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، جلد پنجم، شماره اول.
۳. صباغ زاده، ر؛ الهامی راد، ا؛ آرمین، م. (۱۳۹۹). مطالعه‌ی اثر شرایط کاراملیزاسیون و نوع قند بر شدت قهوه‌ای شدن و ویژگی‌های احیاءکنندگی و آنتی‌اکسیدانی کارامل تولیدی نوآوری در علوم و فناوری غذایی. ۱۲(۳)، ۱-۹.
۴. Shoberi, N.S., *The role of pH, temperature and catalyst type in caramel manufacturing process*. 2010, UMP.
۵. Dai, Y., et al. *Preparation and characterization of modified caramel with binary carboxylic acids*. in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. IOP Publishing.
۶. Elvers, B., *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry*. Vol. 17. 1991: Verlag Chemie Hoboken, NJ.
۷. Al-Abid, M., K. Al-Shoaily, M. Al-Amry, and F. Al-Rawahy. *Preparation of caramel colour from dates*. in *III International Date Palm Conference* 736. 2006.
۸. Laroque, D., et al., *Kinetic study on the Maillard reaction. Consideration of sugar reactivity*. Food chemistry, 2008. **111**(4): p. 1032-1042.
۹. Limsuwanmanee, J., et al., *Antioxidant activity of Maillard reaction products derived from stingray (Himantura signifier) non-protein nitrogenous fraction and sugar model systems*. LWT-Food Science and Technology, 2014. **57**(2): p. 718-724.
۱۰. Dogan, M. and O. Toker, *Hydroxymethylfurfural content and physicochemical properties of the caramel samples enriched with different dietary fibres*. Quality Assurance and Safety of Crops & Foods, 2015. **7**(3): p. 277-285.

- .11 Guan, Y.-G., et al., *Effects of pressure on the glucose–ammonium sulphite caramel solutions*. Food chemistry, 2011. **127** : (3) p. 596-601.
- .12 Karseno, E., T. Yanto, R. Setyowati, and P. Haryanti, *Effect of pH and temperature on browning intensity of coconut sugar and its antioxidant activity*. Food Research, 2018. **2**(1): p. 32-38.
- .13 Kokeb, A., S. Mamo, N. Gabbiye, and A. Assefa, *Synthesis and characterization of caramel from simple sugar for brewing color application*. International Journal of Basic and Applied Sciences, 2015. **2**(1): p. 48-55.
- .14 Kocadağlı, T. and V. Gökmen, *Multiresponse kinetic modelling of Maillard reaction and caramelisation in a heated glucose/wheat flour system*. Food Chemistry, 2016. **211**: p. 892-902.
- .15 Benjakul, S., W. Visessanguan, V. Phongkanpai, and M. Tanaka, *Antioxidative activity of caramelisation products and their preventive effect on lipid oxidation in fish mince*. Food chemistry, 2005. **90**(1-2): p. 231-239.
- .16 Rufián-Henares, J. and S. Pastoriza, *Browning: Non-enzymatic browning*. 2016.
- .17 Eskin, N.M. and F. Shahidi, *Biochemistry of foods*. 2012.
- .18 Jain, D., et al., *Application of non-enzymatic browning of fructose for heating pattern determination in microwave assisted thermal pasteurization system*. Journal of Food Engineering, 2017. **210**: p. 27-34.
- .19 Hwang, I.G., et al., *Biological activities of Maillard reaction products (MRPs) in a sugar–amino acid model system*. Food Chemistry, 2011. **126**(1): p. 221-227.
- .20 Lertittikul, W., S. Benjakul, and M. Tanaka, *Characteristics and antioxidative activity of Maillard reaction products from a porcine plasma protein–glucose model system as influenced by pH*. Food Chemistry, 2007. **100**(2): p. 669-677.
- .21 Coca, M., et al., *Study of coloured components formed in sugar beet processing*. Food chemistry, 2004. **86**(3): p. 421-433.
- .22 Hu, S., et al., *In vitro evaluation of the antioxidant activities of carbohydrates*. Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre, 2016. **7**(2): p. 19-27.
- .23 Lee, G. and C. Lee, *Inhibitory effect of caramelisation products on enzymic browning*. Food Chemistry, 1997. **60**(2): p. 231-235.
- .24 Vollmuth, T.A., *Caramel color safety—an update*. Food and chemical toxicology, 2018. **111**: p. 578-596.
- .25 Troise, A.D., *Maillard reaction and food safety*. 2019.
- .26 Brudzynski, K. and D. Miotto, *Honey melanoidins: Analysis of the compositions of the high molecular weight melanoidins exhibiting radical-scavenging activity*. Food Chemistry, 2011. **127**(3): p. 1023-1030.
- .27 El-Ghorab, A.H., et al., *The effect of pH on flavor formation and antioxidant activity of amino acid and sugars interaction products*. JASMR, 2010. **5**(2): p. 131-139.
- .28 Rahardjo, M., M. Sihombing, and M. Anggraeni. *Color development and antioxidant activity in honey caramel*. in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. IOP Publishing.
- .29 Echavarría, A., J. Pagán, and A. Ibarz, *Antioxidant activity of the melanoidin fractions formed from D-glucose and D-fructose with L-asparagine in the Maillard reaction*. Scientia Agropecuaria, 2013. **4**(1): p. 45-54.
- .30 Tsai, P.-J., et al., *Interactive role of color and antioxidant capacity in caramels*. Food Research International, 2009 : (3) 322 .p. 380-386.
- .31 Brenna, O.V., E.L. Ceppi, and G. Giovannelli, *Antioxidant capacity of some caramel-containing soft drinks*. Food Chemistry, 2009. **115**(1): p. 119-123.
- .32 Chawla, S., R. Chander, and A. Sharma, *Antioxidant properties of Maillard reaction products obtained by gamma-irradiation of whey proteins*. Food chemistry, 2009. **116**(1): p. 122-128.
- .33 Phongkanpai, V., S. Benjakul, and M. Tanaka, *Effect of pH on antioxidative activity and other characteristics of caramelization products*. Journal of Food Biochemistry, 2006. **30**(2): p. 174-186.

- .۳۴ Payet, B., A. Shum Cheong Sing, and J. Smadja, *Assessment of antioxidant activity of cane brown sugars by ABTS and DPPH radical scavenging assays: Determination of their polyphenolic and volatile constituents*. Journal of agricultural and food chemistry, 2005. **53**(26): p. 10074-10079.
- .۳۵ Amin, N.A.M., W.A.W. Mustapha, M.Y. Maskat, and H.C. Wai, *Antioxidative activities of palm sugar-like flavouring*. The Open Food Science Journal, 2010. **4**(1): p. 23-29.
- .۳۶ Woo ,K.S., et al., *Characteristics of the thermal degradation of glucose and maltose solutions*. Preventive nutrition and food science, 2015. **20**(2): p. 102.
- .۳۷ Kocadağlı, T. and V. Gökmen, *Caramelization in foods: a food quality and safety perspective*. 2019.
- .۳۸ Chen, H. and Z. Gu, *Effect of ascorbic acid on the properties of ammonia caramel colorant additives and acrylamide formation*. Journal of Food Science, 2014. **79**(9): p. C1678-C1682.
- .۳۹ Linner, R. *Caramel color: a new method of determining its color hue and tinctorial power*. in *Proc. Soc. Soft Drink Tech. Annual Meeting*. 1970.
- .۴۰ El Hosry, L.; Elias, V.; Chamoun, V.; Halawi, M.; Cayot, P.; Nehme, A.; Bou-Maroun, E. Maillard Reaction: Mechanism, Influencing Parameters, Advantages, Disadvantages, and Food Industrial Applications: A Review. *Foods* **2025**, *14*, 1881.
- .۴۱ Schab, D.; Zahn, S.; Rohm, H. Development of a Caramel-Based Viscoelastic Reference Material for Cutting Tests at Different Rates. *Materials* **2021**, *14*, 3798.
- .۴۲ Luna MP, Aguilera JM. Kinetics of colour development of molten glucose, fructose and sucrose at high temperatures. *Food Biophysics*. 2014 Mar;**9**(1):61-8.
- .۴۳ Barra, G., *The Rheology of Caramel. PhD Thesis*, University of Nottingham, 2004.
- .۴۴ Barra, G., & Mitchell, J.R., *The Rheology of Caramel*. *Current Nutrition & Food Science*, 2013, **9**(1): p. 52-61.

Investigation of physicochemical, rheological and sensory characterization of caramel produced from fructose

Ehsan Firoozi¹, Akram Sharifi^{2*}, Milad Pero³

*Corresponding authors: asharifi@iau.ac.ir

1. Master's Graduate, Department of Food Science and Technology, Qazvin, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.
2. Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Qazvin, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.
3. PhD of Food Engineering, Zar Grain Refinery, Farhikhtegan Zarnam Industrial & Research Group, Karaj, Iran

Abstract

Caramel color is among the most widely used additives in the food industry. This study aimed to produce caramel from fructose and evaluate its physicochemical, rheological, and sensory properties. Fructose-based caramel was prepared using four different methods at 100°C (Method 1: 84.06% fructose + 7.10% ammonia + 8.84% sulfuric acid, 90 min, Method 2: 79.01% fructose + 9.35% ammonia + 11.63% sulfuric acid, 90 min, Method 3: 91.85% fructose + 3.34% ammonia + 4.83% sulfuric acid, 4 h and Method 4: 88.93% fructose + 4.53% ammonia + 6.54% sulfuric acid, 4 h). The samples were analyzed for browning index, reducing power, hydroxymethylfurfural content, total phenolic compounds, antioxidant capacity, color, viscosity, and sensory characteristics. The results indicated that Method 1 produced superior aroma, color, and chewiness, while Method 2 showed better viscosity, hue angle, and sweetness intensity. The highest antioxidant activity was observed in the control sample (70.48%), and the lowest in the sample from Method 4 (29.04%). The highest total phenolic content was also found in the control (1276.7 mg gallic acid/g), followed by the caramel from Method 1 (1151.9 mg gallic acid/g). The lowest phenolic content was recorded in the sample from Method 2. In addition, HPLC analysis identified sinapic acid (1262.9 mg/mL), protocatechuic acid (926.1 mg/mL), catechin (501.6 mg/mL), and ellagic acid (220.09 mg/mL) as the main phenolic compounds in the caramel samples.

Extended Abstract

Introduction:

The application of food colorants is a crucial aspect of modern food processing, enhancing visual appeal, compensating for color loss during processing, and ensuring product uniformity. Among these, caramel color is one of the most widely used due to its broad color range—from light yellow to dark brown—stability, and compatibility with various food systems. Caramel is produced through the thermal degradation of carbohydrates, often in the presence of acids or alkalis, including ammonia and sulfuric acid, resulting in pigments with complex structures rich in hydroxyl, carbonyl, and phenolic functional groups. Fructose, a naturally occurring

monosaccharide found in fruits and honey, is a highly reactive reducing sugar, making it an effective substrate for caramelization. Due to its participation in Maillard and dehydration reactions, fructose-based caramel can exhibit desirable coloration, antioxidant properties, and functional behavior suitable for food applications. Previous studies have shown that process parameters such as temperature, pH, and heating duration significantly influence browning intensity, phenolic content, and antioxidant capacity. Despite the growing global demand for caramel, local production in many countries, including Iran, remains limited, increasing reliance on imports. This study aimed to produce caramel using four different formulations of fructose under controlled thermal conditions and to investigate its physicochemical, rheological, and sensory properties. The research also involved phenolic profiling via HPLC to evaluate the functional potential of each formulation and provide insights for industrial caramel production from domestic raw materials.

Materials and Methods:

Caramel samples were produced from fructose using four distinct formulations under controlled thermal conditions at 100 °C. The formulations included: Method 1 (84.06% fructose, 7.10% ammonia, 8.84% sulfuric acid; 90 minutes), Method 2 (79.01% fructose, 9.35% ammonia, 11.63% sulfuric acid; 90 minutes), Method 3 (91.85% fructose, 3.34% ammonia, 4.83% sulfuric acid; 4 hours), and Method 4 (88.93% fructose, 4.53% ammonia, 6.54% sulfuric acid; 4 hours). The produced samples were subjected to comprehensive physicochemical and functional analyses, including measurement of browning index, reducing power, hydroxymethylfurfural (HMF) concentration, total phenolic content, antioxidant capacity, color parameters, viscosity, and sensory attributes. These evaluations aimed to investigate the impact of compositional variations and processing time on the quality characteristics of caramel, thereby identifying the most suitable method for the production of caramel with desirable technological and sensory properties for application in the food industry.

Results and discussion:

The experimental findings demonstrated that different caramelization methods had a statistically significant effect on the browning index ($p < 0.01$). The control sample showed the highest browning index (0.256), followed by Method 1, which was formulated with 84.06% fructose, 7.10% ammonia, and 8.84% sulfuric acid. Conversely, the lowest browning index was observed in Method 2, where an increased concentration of ammonia and sulfuric acid contributed to reduced browning. This suggests that acidic conditions tend to inhibit browning reactions, while alkaline conditions promote browning due to enhanced Maillard and caramelization reactions. In terms of reducing power, there were no statistically significant differences between the control, Method 3, and Method 4 ($p > 0.01$), with absorbance values of 1.53, 1.48, and 1.36, respectively. However, Methods 1 and 2 exhibited significantly lower reducing power (0.76 and 0.70, respectively), likely due to the influence of higher acid and ammonia content. Increasing the pH favors the formation of enediol anions, thereby enhancing the reducing capacity of the caramel matrix. Hydroxymethylfurfural (HMF) content varied significantly among treatments. The control sample exhibited the highest concentration of HMF (22526 ppm), while Method 2 yielded the lowest. These results indicate that elevated levels of ammonia and acid may alter the reaction pathway, thereby limiting HMF formation. Total phenolic content (TPC) was also

significantly affected by formulation. The control had the highest TPC (1276.7 mg GAE/g), followed by Method 1 (1151.9 mg GAE/g), whereas Method 2 exhibited the lowest value (626.7 mg GAE/g). High-performance liquid chromatography (HPLC) analysis identified key phenolic compounds such as sinapic acid, protocatechuic acid, catechin, and ellagic acid. Antioxidant activity, measured by the DPPH radical scavenging assay, was highest in the control (70.48%) and lowest in Method 4 (29.04%). Methods 1 and 3 demonstrated moderate antioxidant activity (49.33% and 48.06%, respectively), reflecting a favorable balance between formulation and functional properties. Colorimetric analysis showed that the highest chroma (21.81) and total color difference ($\Delta E = 45.284$) were recorded in Method 2, while the control and Method 4 showed the lowest chroma values. The hue angle was highest in Method 4 (0.272) and lowest in Method 2 (0.039), indicating that processing parameters significantly influence caramel color development. Viscosity measurements revealed that both chemical composition and heating temperature played a critical role. Method 2 exhibited the highest viscosity (3912.1 mPa·s), whereas Method 3 had the lowest (144.5 mPa·s), suggesting a direct relationship between acidity, caramelization extent, and molecular weight of resulting compounds. Sensory evaluation, conducted using a 5-point hedonic scale, indicated that caramels from Methods 1 and 2 achieved the highest scores in terms of aroma, taste, and sweetness, while Method 3 received the lowest ratings across these attributes. These findings underscore the importance of optimizing both formulation and process parameters to achieve superior physicochemical and sensory qualities in caramel products.

Conclusion:

This study demonstrates that fructose-based caramel possesses promising physicochemical, antioxidant, and sensory attributes, particularly when specific formulation and processing conditions are optimized. Among the evaluated methods, distinct differences were observed in antioxidant capacity, phenolic content, and overall acceptability, highlighting the critical role of formulation variables in determining final product quality. Further investigation is recommended to comprehensively profile the phytochemical composition of the caramel matrix, evaluate its functional properties in food systems, and assess the impact of storage and processing variables on product stability. Future research should also focus on the development and optimization of scalable, food-grade caramel production techniques, emphasizing cost-effectiveness, process efficiency, and consistency in product characteristics to facilitate successful industrial application of laboratory-scale findings.

Keywords: Caramel, Fructose Syrup, Physicochemical Properties, Sensory Attributes