

مقاله پژوهشی

بررسی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، رئولوژیکی و حسی کارامل تولیدشده از فروکتوز

احسان فیروزی^۱، اکرم شریفی^{۲*}، میلاد پرو^۳

۱. دانش‌آموخته 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

(تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۰۴/۱۸، تاریخ آخرین بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۲۰، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۰)

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 °C 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٪ و کمترین فعالیت آنتی‌اکسیدانی مربوط به نمونه کارامل تهیه شده به روش چهارم با ۲۹/۰۴٪ بود. هم‌چنین بیشترین میزان ترکیبات فنولی مربوط به نمونه کارامل شاهد با ۱۲۷۶/۷ mgGA/g بود. پس از آن نمونه کارامل فروکتوز تهیه شده به روش اول ترکیبات فنولی برابر با ۱۱۵۱/۹ mgGA/g 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 mg/ml)، پروتوکاتچوئیک اسید (۹۲۶/۱ mg/ml)، کاتچین (۵۰۱/۶ mg/ml) و الاگیک اسید (۲۲۰/۰۹ mg/ml) بود.

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

۱. مقدمه

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 صنعت‌گران 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.

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.

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 حرارت‌دادن 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 شیرین‌کننده 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 نانوائی 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

1. Phenolic groups
2. Hydroxyl
3. Aldehyde
4. Carboxyl
5. Fructose

۱.۲. تولید کارامل فروکتوز

فری‌سیانید ۱٪ به مخلوط افزوده گردید. ترکیب حاصل به مدت ۲۰ دقیقه در دستگاه بن‌ماری (LAUDA, E200) در دمای ۵۰°C قرار گرفت. پس از آن، ۱ ml محلول تری‌کلرو استیک اسید ۱۰٪ به مخلوط اضافه و نمونه به مدت ۱۰ دقیقه در دستگاه سانتیفریوژ با سرعت ۷۵۰ دور بر دقیقه سانتیفریوژ شد. پس از سانتیفریوژ، ۱ ml از سوپرناتانت جدا شده و با ۱ ml آب مقطر و ۲۰۰ μl محلول فریک کلرید ۰/۱٪ مخلوط گردید. سپس جذب نمونه‌ها توسط دستگاه اسپکتروفتومتری در طول موج ۷۰۰ nm 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٪ استفاده شد. برای تهیه محلول کاریز یک، ۱۵ g فروسیانور پتاسیم با ۳ مولکول آب مقطر به درون بالن ژوژه ۱۰۰ ml منتقل شد و در مقداری آب مقطر حل شد. سپس با آب مقطر به حجم ۱۰۰ ml رسانده شد. برای تهیه محلول کاریز دو نیز، ۳۰ g استات روی با ۲ مولکول آب مقطر، با استفاده از کمی آب مقطر حل شده و سپس به حجم ۱۰۰ ml رسانده شد. محلول بی‌سولفیت سدیم ۰/۲٪ نیز با حل کردن ۰/۲ g هیدروژن سولفیت در بالن ژوژه ۱۰۰ ml و رساندن حجم آن به ۱۰۰ ml با آب مقطر، تهیه گردید. پس از تهیه محلول‌های مورد نیاز، ۵ g از نمونه کارامل در کمی آب مقطر حل شده و به بالن ژوژه ۵۰ ml منتقل شد، سپس ۵ ml از هر یک از محلول‌های کاریز یک و دو به آن اضافه شده و خوب مخلوط گردید و با آب مقطر به حجم ۵۰ ml رسانده شد. در مرحله بعد محلول صاف شده و ۱۰ ml اول آن دور ریخته شد و بقیه جمع‌آوری گردید. به دو لوله آزمایش، هر یک ۵ ml از محلول صاف شده کارامل منتقل شد. به یکی از دو لوله ۵ ml آب مقطر و به لوله دیگر ۵ ml بی‌سولفیت سدیم جهت غیرفعال شدن جذب هیدروکسی متیل فورفورال اضافه گردید. محتویات لوله‌ها به خوبی

برای تولید کارامل فروکتوز، از چهار روش مختلف استفاده شد. در روش اول، ۱۴۰ g شربت فروکتوز با ۱۳ ml آمونیاک ۲۵٪ مخلوط شد. سپس ۸ ml اسید سولفوریک ۹۵٪ به صورت قطره‌قطره و هم‌زمان با هم‌زدن، به مخلوط افزوده شد. مخلوط حاصل به مدت ۹۰ دقیقه در بن‌ماری با دمای ۱۰۰°C قرار گرفت تا رنگ کارامل تشکیل شود. در روش دوم، ۱۰۰ g شربت فروکتوز با ۱۳ ml آمونیاک ۲۵٪ مخلوط شد. سپس ۸ ml اسید سولفوریک ۹۵٪ به همان صورت اضافه و هم‌زمان هم‌زده شد. در ادامه، ۲۰۰ ml اتانول و ۱۰۰ آب به مخلوط افزوده شد. این ترکیب به مدت ۹۰ دقیقه در بن‌ماری با دمای ۱۰۰°C حرارت داده شد. پس از اتمام فرآیند، فاز اتانول با استفاده از دستگاه روتاری تبخیر در خلأ حذف شد. در روش سوم، ۱۴۰ g شربت فروکتوز با ۶/۵ ml آمونیاک ۲۵٪ مخلوط شد. سپس ۴ ml اسید سولفوریک ۹۵٪ به صورت قطره‌قطره به آن افزوده و هم‌زمان هم‌زده شد. این مخلوط به مدت ۴ ساعت در دمای ۱۰۰°C 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 g، از ۱۰۰ g شربت فروکتوز استفاده شد. سایر مراحل مشابه روش سوم بود [۷]. برای مقایسه، یک نمونه از رنگ کارامل تجاری موجود در بازار تهیه و به عنوان 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 mg از نمونه در بالن ژوژه ریخته و با آب مقطر به حجم ۱۰۰ ml رسانده شد. سپس میزان جذب آن در طول موج ۶۱۰ nm تعیین گردید [۸].

۳.۲. تعیین قدرت احیا کنندگی

به منظور ارزیابی قدرت احیا کنندگی، محلول رقیق شده کارامل به میزان ۱ ml با ۱ ml بافر فسفات سدیم ۰/۲ مولار و pH برابر با ۶/۶ مخلوط شد. سپس، ۱ ml محلول پتاسیم

1. Hydroxymethylfurfural (HMF)

2. Furfural

مرحله بعد ۵ ml از کارامل تولیدی به ۵۰۰ ml آب مقطر اضافه شد تا رقیق گردد. سپس ۱۰ ml از عصاره رقیق شده به ۱۰ ml الکل ۹۶٪ اضافه گردید. از محلول حاصل ۱ ml به ۱/۵ ml معرف فولین سیوکالتیو اضافه گردید و ۱۰ دقیقه به آن زمان داده شد. در مرحله بعد ۱/۵ ml بی‌کربنات 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 nm تعیین و یادداشت گردید. برای اندازه‌گیری ترکیب و پروفایل پلی فنول‌های موجود در نمونه کارامل نیز از دستگاه (Young HPLC lin Acme 9000, South Korea) استفاده شد [۱۲].

۷.۲. ارزیابی پارامترهای رنگی

سه پارامتر L^* ، a^* و b^* توسط رنگ‌سنج لایوباند (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].

$$(3) \quad \text{کروما} = (a^2 + b^2)^{1/2}$$

$$(4) \quad \text{تغییرات کلی رنگ} = (1^2 + a^2 + b^2)^{1/2}$$

$$(5) \quad \text{زاویه رنگ} = \tan^{-1} b^* / a^*$$

۸.۲. اندازه‌گیری ویسکوزیته

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

مخلوط شده و جذب آن‌ها با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتری در طول موج‌های ۲۸۴ nm و ۳۳۶ nm خوانده شد. میزان هیدروکسی متیل فورفورال با استفاده از رابطه زیر (۱) محاسبه گردید [۱۰].

$$(1) \quad HMF = (A_{284} - A_{336}) \times 149.7 \times 5 \times (D/W)$$

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

۵.۲. تعیین ظرفیت آنتی‌اکسیدانی با استفاده از آزمون

(2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) DPPH

به‌منظور بررسی ظرفیت آنتی‌اکسیدانی نمونه‌ها، مقدار ۱۰ ml از محلول کارامل با ۴۰ اتانول ۸۰٪ مخلوط و به مدت یک ساعت در شرایط هم‌زدن مداوم قرار گرفت. سپس محلول حاصل صاف گردید. مقدار ۵/۰ ml از محلول صاف‌شده با ۳/۵ ml محلول ۰۰۰۴٪ از معرف DPPH مخلوط و با متانول به حجم ۱۰۰ ml رسانده شد. محلول تهیه‌شده به مدت ۳۰ دقیقه در محیط تاریک نگهداری شد. پس از پایان زمان واکنش، جذب محلول در طول موج ۵۱۷ nm 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:

$$(2) \quad \text{میزان جذب نمونه شاهد} - (\text{جذب نمونه شاهد} + \text{میزان جذب نمونه اتانولی کارامل}) = DPPH$$

۶.۲. تعیین میزان پلی فنول‌ها

برای اندازه‌گیری میزان پلی فنول‌های کارامل تولیدی، از معرف فولین سیوکالتیو^۱ استفاده شد. ۱۰ ml از معرف فولین سیوکالتیو به داخل بالن ژوژه ۱۰۰ ml منتقل گردید و با آب مقطر به حجم رسانده شد. همچنین ۷/۵ g کربنات سدیم در آب مقطر حل شده و به حجم ۱۰۰ ml رسانده شد. در

۹.۲. 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].

۱۰.۲. 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٪ ($P_{value} < 0.01$) انجام شد. کلیه نمودارها با نرم افزار Excel 2016 رسم شدند.

۳. نتایج و بحث

۱.۳. شاخص قهوه‌ای شدن

در پژوهش حاضر، تأثیر 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، تأثیر 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 ۰/۸۴/۰۶٪ فروکتوز + ۰/۷/۱۰٪ آمونیاک + ۰/۸/۸۴٪ 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 ۰/۷۹/۳۰۱٪ فروکتوز + ۰/۰/۳۵٪ آمونیاک + ۰/۱۱/۶۳٪ 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 تأثیر اسیدسولفوریک 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 دی کربونیل 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].

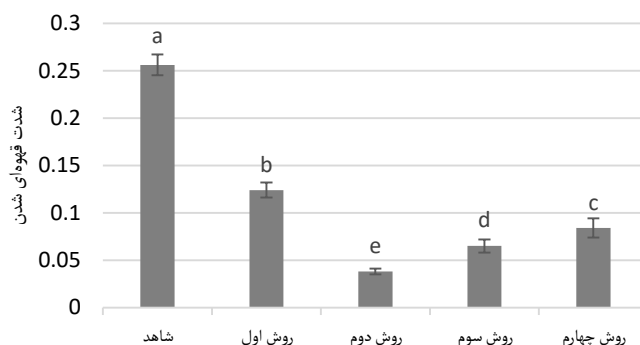
صباغ‌زاده و همکاران در سال ۱۳۹۹، تأثیر شرایط کاراملیزاسیون و نوع قند مورد استفاده بر شدت قهوه‌ای شدن کارامل را بررسی نمودند و بیان کردند که کمترین میزان جذب نوری مربوط به کارامل حاصل از ساکاروز در pH=۴ و بیشترین میزان جذب نور نیز مربوط به کارامل فروکتوز در pH=۱۰ بود. همچنین کارامل فروکتوز تهیه شده در 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].

در تحقیقی دیگر، Karseno و همکاران در سال ۲۰۱۸، تأثیر 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].

1. Caramelization
2. Retroaldolization
3. Enolization

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 تجزیه‌ای قلیایی مرتبط بود [۲۱].

علاوه بر این، Hwang و همکاران (۲۰۱۱)، گزارش کردند که در طی حرارت‌دهی در دمای 120°C 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



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

Fig 1. Effect of different methods on the browning intensity of the produced caramel (Method 1: 84.06% fructose + 10.7% 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 + 3.43% ammonia + 4.83% sulfuric acid, 4 h; Method 4: 88.93% fructose + 4.53% ammonia + 6.54% sulfuric acid, 4 h)

سولفوریک و کارامل حاوی ۷۹/۰۱٪ فروکتوز + ۹/۳۵٪ آمونیاک + ۱۱/۶۳٪ اسید سولفوریک به ترتیب ۰/۷ و ۰/۷۶ 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)، تأثیر نوع قند و pH بر میزان احیاکنندگی کارامل را بررسی کردند و

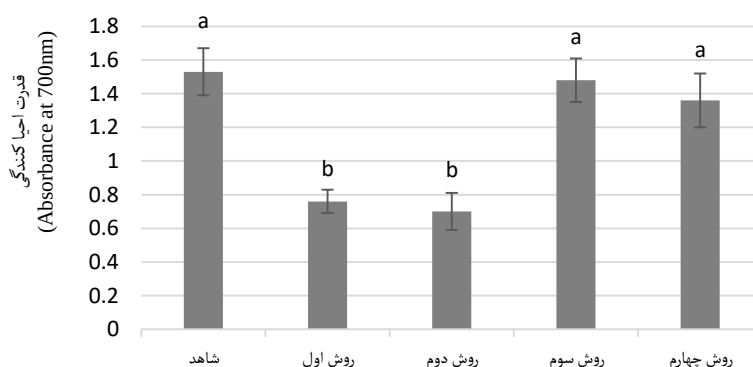
۲.۳. قدرت احیاکنندگی

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

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°C حرارت دیده بودند، می‌توان اذعان نمود که زمان حرارت‌دهی نیز بر میزان قدرت احیاکنندگی قند مؤثر 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°C 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°C به مدت ۹۰ دقیقه حرارت دیده بود قدرت احیاکنندگی داشت [۲۳].

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



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)

Fig 2. Effect of different methods on the reducing power of the produced caramel (Method 1: 84.06% fructose + 10.7% 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 + 3.43% ammonia + 4.83% sulfuric acid, 4 h; Method 4: 88.93% fructose + 4.53% ammonia + 6.54% sulfuric acid, 4 h)

قهوه‌ای به‌خاطر 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

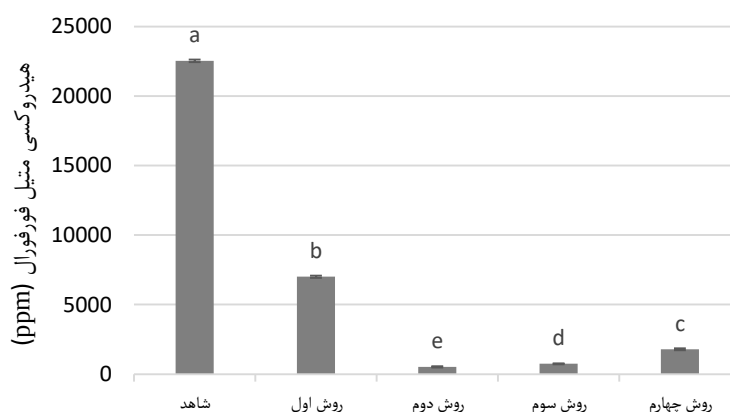
۳.۳. هیدروکسی متیل فورفورال

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

1. Fructofuranose

کمترین میزان هیدروکسی 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 ۳۳۷۰۰ تا ۷۰۰ (ppm) گزارش کردند. کارامل نوع III کمترین غلظت هیدروکسی متیل فورفورال را داشت [۲۴].

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 mg/kg (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



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)

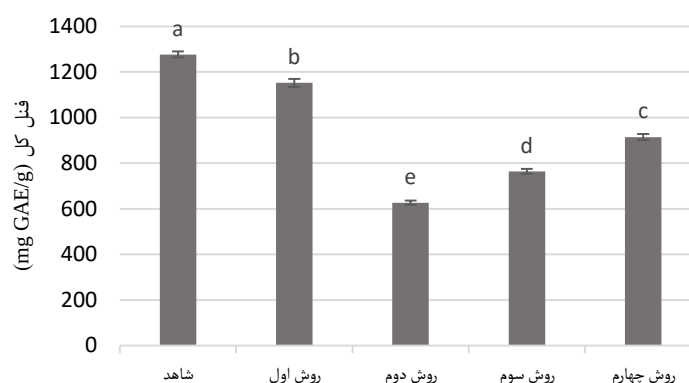
Fig 3. Effect of different methods on hydroxymethylfurfural (HMF) of the produced caramel (Method 1: 84.06% fructose + 7.10% ammonia + 8.84% sulfuric acid, 90 min; Method 2: 79.01% fructose + 9.35% ammonia + 11.63% sulfuric acid, 90 min; Method 3: 91.85% fructose + 3.43% ammonia + 4.83% sulfuric acid, 4 h; Method 4: 88.93% fructose + 4.53% ammonia + 6.54% sulfuric acid, 4 h)

ترکیبات فنولی برابر با ۱۱۵۱/۹ mgGA/g 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 mgGA/g بود.

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 mgGA/g 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،

1. Total Phenols



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)

Fig 4. Effect of different methods on the total phenolic compounds of the produced caramel (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 + 3.43% ammonia + 4.83% sulfuric acid, 4 h; Method 4: 88.93% fructose + 4.53% ammonia + 6.54% sulfuric acid, 4 h)

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].

۵.۳. فعالیت آنتی‌اکسیدانی (DPPH)

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٪ 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٪ 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

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^۱ اسید (۱۲۶۲/۹ mg/ml)، پروتوکاتچونیک^۲ اسید (۹۲۶/۱ mg/ml)، کاتچین^۳ (۵۰۱/۶ mg/ml) و الایگیک^۴ اسید (۲۲۰/۰۹ mg/ml) بود.

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

Karseno و همکاران در سال ۲۰۱۸، تأثیر 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

1. Sinapic
2. Protocatechuic
3. Catechin
4. Ellagic

همکاران (۲۰۲۰)، فعالیت آنتی‌اکسیدانی عصاره متانولی کارامل عسل را به روش DPPH ارزیابی کردند و نشان دادند که کارامل عسل دارای فعالیت آنتی‌اکسیدانی هستند. این محققین گزارش دادند که با افزایش دمای حرارت‌دهی میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی و مهار رادیکال‌های آزاد DPPH افزایش پیدا کرد. این محققین میزان ظرفیت آنتی‌اکسیدانی سه نمونه کارامل روشن، متوسط و تیره حاصل از عسل را به ترتیب ۱۲/۸۱۶٪، ۲۹/۰۹۸٪ و ۳۳/۵۳۳٪ گزارش کردند [۲۸]. در پژوهشی دیگر، Karseno و همکاران در سال ۲۰۱۸، تأثیر دما و pH بر روی فعالیت آنتی‌اکسیدانی 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 Echavarría 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 دی‌ساکارید را با غلظت‌های مختلف ۱ تا ۴۰٪، در pHهای برابر ۳، ۷ و ۱۰، در دمای ۹۰°C 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 دی‌ساکاریدها ظرفیت آنتی‌اکسیدانی بهتری را در شرایط قلیایی‌تر 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 آنتی‌اکسیدانی زیاد تولید می‌شوند [۱۲].

Brenna و همکاران در سال ۲۰۰۹، فعالیت آنتی‌اکسیدانی برخی از نوشابه‌های حاوی کارامل، مانند نوشابه‌های کولا و چینوتو را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که حتی اگر نوشابه‌های غیرالکلی نسبت به سایر نوشیدنی‌ها مانند چای، قهوه یا شکلات فعالیت آنتی‌اکسیدانی کمتری داشته باشند، اما ممکن است به ترکیب آنتی‌اکسیدان‌های رژیم غذایی کمک کنند [۳۱]. Chawla و همکاران (۲۰۰۹)، گزارش

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٪ 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 تأثیر شرایط مختلف کاراملیزاسیون بر روی میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی تحقیقات زیادی صورت گرفته است. از جمله، صباغ زاده و همکاران در سال ۱۳۹۹، تأثیر 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٪ گزارش کردند. با افزایش pH میزان ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کارامل تمامی قندهای مورد آزمایش افزایش پیدا کرد [۳].

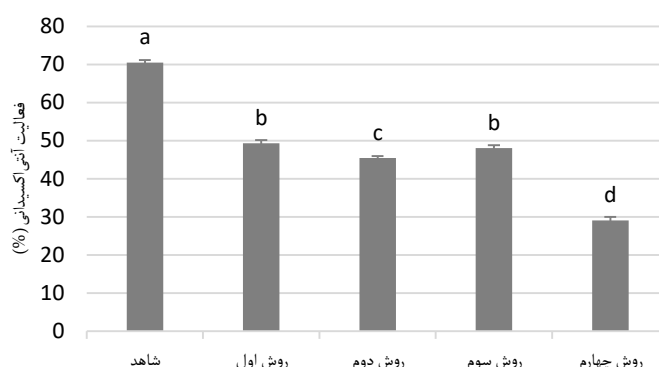
در تحقیقی دیگر، Dai و همکاران در سال ۲۰۲۱، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کل کارامل ساده و کارامل‌های اصلاح شده با اسیدهای کربوکسیلیک را به روش FRAP^۱ اندازه‌گیری کردند و گزارش دادند که ظرفیت آنتی‌اکسیدانی سه نمونه کارامل خام، مونو استر کارامل سوکسینات و مونو استر کارامل مالئات به ترتیب ۰/۷۵۵ mM، ۰/۳۶۰ mM و ۰/۱۹۷ mM به دست آمد. نتایج نشان داد که ظرفیت آنتی‌اکسیدانی 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 آنتی‌اکسیدانی می‌باشند، نسبت دادند. اسیدهای کربوکسیلیک ظرفیت آنتی‌اکسیدانی مربوطه را ندارند [۵]. در مطالعه‌ای دیگر، Rahardjo و

1. Ferric Reducing Antioxidant Power

آنتی‌اکسیدانی با شدت قهوه‌ای شدن همبستگی دارد و با افزایش شدت قهوه‌ای شدن، فعالیت آنتی‌اکسیدانی نیز افزایش می‌یابد [۱۲]. Amin و همکاران (۲۰۱۰) نیز نشان دادند که افزایش شدت قهوه‌ای شدن قند خرما منجر به افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی آن شد [۳۵]. با بررسی نتایج حاصل از شاخص قهوه‌ای شدن و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی نمونه‌های کارامل در پژوهش حاضر، مشاهده می‌گردد که نمونه شاهد که بیشترین شاخص قهوه‌ای شدن را داشت، بیشترین ظرفیت آنتی‌اکسیدانی 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 آنتی‌اکسیدانی را از خود نشان داد. بنابراین نتایج پژوهش حاضر نیز ارتباط مستقیم شدت قهوه‌ای شدن و فعالیت آنتی‌اکسیدانی کارامل را تایید می‌کند.

کردند که محصولات حاصل از واکنش میلارد، به ویژه ملانوئیدین‌ها، فعالیت آنتی‌اکسیدانی 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 آنتی‌اکسیدانی 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 پلی‌فنل و ترکیبات فرار آن‌ها مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که عصاره‌های شکر قهوه‌ای علیرغم غلظت کم ترکیبات فنلی و فرار، خاصیت آنتی‌اکسیدانی و مهارکنندگی رادیکال‌های آزاد DPPH بالایی داشتند [۳۴].

در تحقیقات پیشین گزارش شده است که میزان فعالیت



شکل (۵) اثر روش‌های مختلف بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی 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)

Fig 4. Effect of different methods on the total phenolic compounds of the produced caramel (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 + 3.43% ammonia + 4.83% sulfuric acid, 4 h; Method 4: 88.93% fructose + 4.53% ammonia + 6.54% sulfuric acid, 4 h)

۹.۳ پارامترهای رنگی

a* و b* تفاوت معنی‌داری با یکدیگر داشتند ($P_{value} < 0.01$).

بیشترین میزان روشنایی (۱۱/۹۷) مربوط به نمونه کارامل تهیه‌شده به روش دوم بود. در حالی که کمترین میزان شاخص L* در نمونه کارامل تهیه‌شده به روش چهارم با شاخص L* برابر ۲/۰۳ مشاهده شد. نتایج ارزیابی L* بیانگر بالاتر بودن میزان این شاخص در نمونه‌های کارامل فروکتوز

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 تولیدشده به روش‌های مختلف از نظر پارامترهای L*

سوکسینات منجر به بهبود دو برابری شاخص رنگ کارامل خام شد. اما میزان شاخص‌های قرمزی و زردی مونو استر 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 تولیدشده 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

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 تهیه‌شده 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

مربوط به نمونه کارامل تهیه‌شده 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 107°C در مقایسه با کارامل متوسط (180°C – 182°C) رنگ روشن‌تری داشت. اما کارامل ساخته شده با دمای 188°C تا 190°C 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].

Chen و Gu در سال ۲۰۱۴، تأثیر استفاده از اسید اسکوربیک بر رنگ کارامل آمونیاکی را بررسی کردند و نشان دادند که با افزایش غلظت اسید اسکوربیک، شدت رنگ کارامل آمونیاکی روند کاهشی را نشان داد. نمونه شاهد که کارامل آمونیاکی حاصل از مخلوط گلوکز و آمونیاک در غیاب اسید اسکوربیک 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 براساس ارزیابی جذب نور با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتری در طول موج‌های ۵۱۰ nm و ۶۱۰ nm ارائه داد و محدوده شاخص رنگ برای رنگ کارامل را $3/5 - 7/5$ گزارش کرد [۳۹].

شاهد با شاخص رنگ $4/27$ و کارامل تهیه شده به روش چهارم (حاوی $88/93\%$ فروکتوز + $4/53\%$ آمونیاک + $6/54\%$ اسید سولفوریک) با $3/65$ کمترین میزان تغییرات رنگ را نشان دادند. میزان این شاخص در نمونه‌های کارامل تهیه‌شده به روش اول و کارامل تهیه شده به روش سوم به ترتیب برابر با $35/07$ و $11/58$ 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 تهیه‌شده 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 ($P_{\text{value}} < 0.01$). بیشترین زاویه رنگ ($0/272$) مربوط به نمونه کارامل تهیه شده به روش چهارم (حاوی $88/93\%$ فروکتوز + $4/53\%$ آمونیاک + $6/54\%$ اسید سولفوریک) بود. همچنین کمترین میزان این شاخص مربوط به نمونه کارامل تهیه‌شده به روش دوم (حاوی $79/01\%$ فروکتوز + $9/35\%$ آمونیاک + $11/63\%$ اسید سولفوریک)، با زاویه رنگ $0/39$ بود. زاویه رنگ نمونه‌های کارامل شاهد، کارامل تهیه شده به روش اول و کارامل تهیه شده به روش سوم، به ترتیب $0/153$ ، $0/132$ و $0/251$ برآورد شد. نتایج کسب شده حاکی از آن است که با افزایش غلظت آمونیاک و اسید سولفوریک در نمونه‌های کارامل فروکتوز، میزان زاویه رنگ به‌طور قابل توجهی کاهش پیدا کرده است.

در ارزیابی تغییرات کلی رنگ نیز، بیشترین میزان تغییرات رنگ ($284/45$) مربوط به نمونه کارامل تهیه شده به روش دوم بود. همچنین نمونه‌های کارامل شاهد و کارامل تهیه‌شده 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

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

Table 1. Comparison of the mean values of color parameters L ، a ، b^* ، chroma، total color difference، and hue angle of different caramel samples

Hue Angle	Total Color Difference	Chroma	b^*	a^*	L^*	Sample
$^{c}0.153 \pm 0.004$	$^{d}4.27 \pm 0.34$	$^{d}1.53 \pm 0.19$	$^{d}-1.71 \pm 0.08$	$^{e}0.48 \pm 0.09$	$^{cd}2.33 \pm 0.27$	Control
$^{d}0.132 \pm 0.008$	$^{b}3.507 \pm 0.39$	$^{b}2.774 \pm 0.28$	$^{b}1.21 \pm 0.07$	$^{b}7.35 \pm 0.11$	$^{b}3.83 \pm 0.32$	۱ Method
$^{e}0.039 \pm 0.003$	$^{a}2.84/4.5 \pm 0.61$	$^{a}2.12/8.1 \pm 0.47$	$^{a}1.190 \pm 0.14$	$^{a}1.6/8.7 \pm 0.14$	$^{a}1.197 \pm 0.24$	۲ Method
$^{b}0.251 \pm 0.005$	$^{c}1.158 \pm 0.49$	$^{c}7.85 \pm 0.39$	$^{c}0.19 \pm 0.07$	$^{c}3.96 \pm 0.07$	$^{c}2.74 \pm 0.19$	۳ Method
$^{a}0.272 \pm 0.010$	$^{d}3.65 \pm 0.29$	$^{d}1.59 \pm 0.24$	$^{d}-1.56 \pm 0.10$	$^{d}0.87 \pm 0.13$	$^{d}2.03 \pm 0.16$	۴ Method

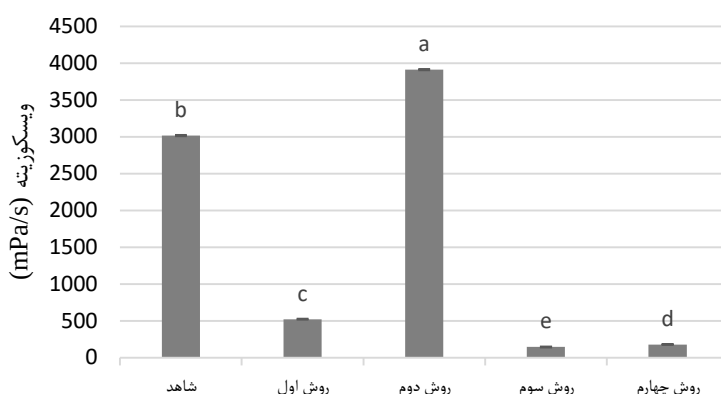
Values are presented as mean $\pm$ standard deviation. Different Latin letters indicate significant differences between the values in each column at a 95% confidence level. (Method 1: 84.06% fructose + 7.10% ammonia + 8.84% sulfuric acid, 90 min; Method 2: 79.01% fructose + 9.35% ammonia + 11.63% sulfuric acid, 90 min; Method 3: 91.85% fructose + 3.43% ammonia + 4.83% sulfuric acid, 4 h; Method 4: 88.93% fructose + 4.53% ammonia + 6.54% sulfuric acid, 4 h)

۱۰.۳. ویسکوزیته

مطالعات رئولوژیک نشان داده‌اند که کاهش آب با افزایش دما منجر به افزایش ویسکوزیته در کارامل‌های تولید شده از ساکارز می‌شود [۴۴] که تأییدی 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 به‌طور بسیار سریعی کاهش پیدا کرد. گلوکز در دمای 145°C و زمان تماس هفت ساعت به کمترین میزان ویسکوزیته رسید [۱۳].

در پژوهش حاضر، میزان ویسکوزیته نمونه‌های کارامل فروکتوز تهیه‌شده 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 ($P_{\text{value}} < 0.01$). به طوری که بیشترین ویسکوزیته مربوط به نمونه کارامل تهیه‌شده به روش دوم (حاوی 79.01% فروکتوز + 9.35% آمونیاک + 11.63% اسید سولفوریک) با مقدار $3912/1 \text{ mPa}$ بود. همچنین نمونه کارامل تهیه شده به روش سوم (حاوی 79.01% فروکتوز + 9.35% آمونیاک + 11.63% اسید سولفوریک) کمترین میزان ویسکوزیته را با مقدار ویسکوزیته $144/5 \text{ mPa}$ نشان داد. میزان ویسکوزیته نمونه‌های کارامل تهیه‌شده به روش اول، چهارم و نمونه شاهد به‌ترتیب برابر با $521/6$ ، $178/2$ و $3017/1 \text{ mPa}$ تعیین شد.

با توجه به اینکه فروکتوز به‌عنوان مونوساکارید کوچکتر در دمای پایین‌تری (حدود 110°C) نسبت به ساکارز (حدود 160°C) 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 تولیدشده از شربت فروکتوز دارای مولکول‌های کوچک‌تر و در نتیجه ویسکوزیته پایین‌تری نسبت به کارامل حاصل از ساکارز باشد. همچنین،



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)

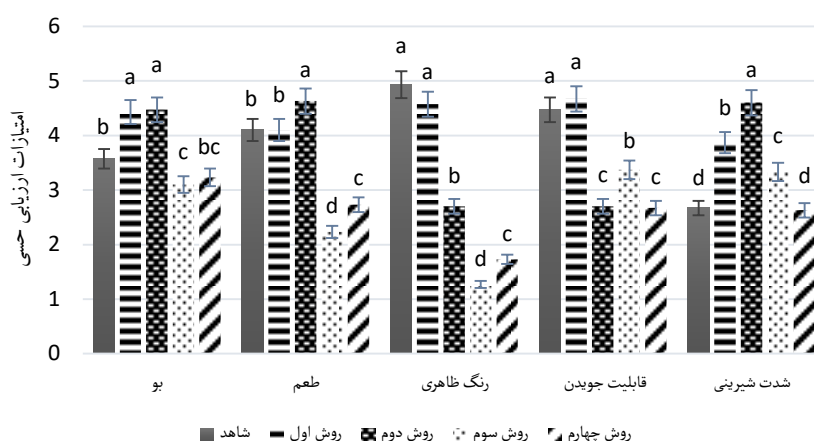
Fig 6. Values are presented as mean $\pm$ standard deviation. Different Latin letters indicate significant differences between the values in each column at a 95% confidence level. (Method 1: 84.06% fructose + 7.10% ammonia + 8.84% sulfuric acid, 90 min; Method 2: 79.01% fructose + 9.35% ammonia + 11.63% sulfuric acid, 90 min; Method 3: 91.85% fructose + 3.43% ammonia + 4.83% sulfuric acid, 4 h; Method 4: 88.93% fructose + 4.53% ammonia + 6.54% sulfuric acid, 4 h)

۱۱.۳. ارزیابی حسی نمونه‌های کارامل

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 تهیه‌شده 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 تهیه‌شده به روش دوم نسبت به سایر نمونه‌ها شیرین‌تر بود و بیشتر مورد پسند ارزیاب‌ها قرار گرفت. در حالی که نمونه کارامل تهیه‌شده 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.

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 تهیه‌شده 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



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)

Fig 7. Effect of different methods on the sensory evaluation characteristics of the produced caramel (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 + 3.43% ammonia + 4.83% sulfuric acid, 4 h; Method 4: 88.93% fructose + 4.53% ammonia + 6.54% sulfuric acid, 4 h)

۴. نتیجه‌گیری

روش دوم، بیشترین میزان تغییرات کلی رنگ (ΔE) مربوط به نمونه کارامل تهیه‌شده به روش دوم و بیشترین زاویه رنگ یا زاویه هیو (Hue) مربوط به نمونه کارامل تهیه‌شده به روش چهارم بود. همچنین بیشترین میزان شاخص‌های L^* یا روشنایی، a^* یا قرمزی، b^* یا زردی در نمونه کارامل فروکتوز تهیه‌شده به روش دوم مشاهده گردید. نمونه کارامل فروکتوز تهیه‌شده به روش دوم، بیشترین ویسکوزیته را داشت. نتایج ارزیابی حسی نشان داد که ارزیاب‌ها به عطر و بوی حاصل از نمونه‌های کارامل تهیه‌شده به روش اول و دوم امتیاز بیشتری را اختصاص دادند. از نظر ویژگی طعم نیز کارامل تهیه‌شده به روش دوم بالاترین امتیاز را از ارزیاب‌ها دریافت کرد. نمونه‌های کارامل شاهد و کارامل تهیه‌شده به روش اول بیشترین امتیاز از نظر رنگ ظاهری را داشتند. همچنین نمونه کارامل تهیه‌شده به روش دوم نسبت به سایر نمونه‌ها شیرین‌تر بود. نمونه‌های شاهد و نمونه کارامل تهیه‌شده به روش اول قابلیت جویدن بهتری داشتند و بیشتر مورد پسند ارزیاب‌ها قرار گرفتند.

نتایج حاصل از پژوهش حاضر حاکی از آن بود که نمونه‌های کارامل فروکتوز تهیه‌شده به چهار روش مختلف از نظر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، رئولوژیکی و حسی با یکدیگر تفاوت داشتند. نتایج بیانگر این بود که شاخص قهوه‌ای‌شدن نمونه کارامل شاهد و پس از آن نمونه کارامل فروکتوز تهیه‌شده 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 تهیه‌شده به روش اول مشاهده شد. ترکیبات فنولی شناسایی شده در نمونه کارامل شامل سیناپیک اسید، پروتوکاتچونیک 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 تهیه‌شده به

منابع

- [1] Bagheri, H., Kashaninejad, M., Ziaee Far, A., & Alami, M. (2016). Evaluation of color parameters, moisture content, and energy

consumption during peanut roasting using hot air. *Innov. Food Technol.*, 3(11), 59–71. [In Persian]. DOI: [10.22104/JIFT.2016.290](https://doi.org/10.22104/JIFT.2016.290)

- [2] Keramat, J., & Malek, S. (2001). Removal of caramel colours from sugar beet molasses and its characteristics and application in food industry. *J. Crop Prod. Process.* [In Persian] <http://jcprp.iut.ac.ir/article-1-233-en.html>
- [3] Sabaghzadeh, R., Elhami Rad, A., & Armin, M. (2020). Study of the effect of caramelization conditions and type of sugar on browning intensity, reducing properties, and antioxidant characteristics of produced caramel. *J. Innov. Food Sci. Technol.*, 12(3), 1–9. [In Persian] DOI: [10.30495/jfst.2020.674095](https://doi.org/10.30495/jfst.2020.674095)
- [4] Shoberi, N.S., (2010). *The role of pH, temperature and catalyst type in caramel manufacturing process.* UMP.
- [5] Dai, Y., et al. (2021). *Preparation and characterization of modified caramel with binary carboxylic acids.* in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* IOP Publishing.
- [6] Elvers, B. (1991). *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry.* Vol. 17., Verlag Chemie Hoboken, NJ.
- [7] Al-Abid, M., Al-Shoaily, K., Al-Amry, M., & Al-Rawahy, F. (2007). *Preparation of caramel colour from dates.* *Acta Hort.*, 736. DOI: [10.17660/ActaHortic.2007.736.53](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2007.736.53)
- [8] Laroque, D., Inisan, C., Berger, C., Vouland, E., Dufossé, L., Guérard, F. (2008). *Kinetic study on the Maillard reaction. Consideration of sugar reactivity.* *Food Chem.*, 111(4), p. 1032-1042. DOI: [10.1016/j.foodchem.2008.05.033](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.05.033)
- [9] Limsuwanmanee, J., Chaijan, M., Manurakchinakorn, S., Benjakul, S., Panpipat, W., Klomkiao, S. (2014). Antioxidant activity of Maillard reaction products derived from stingray (*Himantura signifier*) non-protein nitrogenous fraction and sugar model systems. *LWT*, 57(2), p. 718-724. DOI: [10.1016/j.lwt.2014.01.042](https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.01.042)
- [10] Dogan, M. & Toker, O. (2015). Hydroxymethylfurfural content and physicochemical properties of the caramel samples enriched with different dietary fibres. *Qual. Assur. Saf. Crops Foods*, 7(3), p. 277-285 , DOI: [10.3920/QAS2013.0284](https://doi.org/10.3920/QAS2013.0284)
- [11] Guan, Y.G., Yu, P., Yu, Sh., Xu, X., Shi, W., Sun, W. (2011). Effects of pressure on the glucose-ammonium sulphite caramel solutions. *Food Chem.*, 127, p. 596-601 . DOI: [10.1016/j.foodchem.2011.01.049](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.01.049)
- [12] Karseno, E., T. Yanto, R. Setyowati, and P. Haryanti (2018). Effect of pH and temperature on browning intensity of coconut sugar and its antioxidant activity. *Food Res.*, 2(1), p. 32-38. DOI: [10.26656/fr.2017.2\(1\).175](https://doi.org/10.26656/fr.2017.2(1).175)
- [13] Kokeb, A., Mamo, S., Gabbiye, N., & Assefa, A. (2015). Synthesis and characterization of caramel from simple sugar for brewing color application. *Int. J. Basic Appl. Sci.*, 2(1), 48–55.
- [14] Kocadağlı, T., & Gökmen, V. (2016). Multiresponse kinetic modelling of Maillard reaction and caramelisation in a heated glucose/wheat flour system. *Food Chem.*, 211, 892–902. DOI: [10.1016/j.foodchem.2016.05.150](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.05.150)
- [15] Benjakul, S., Visessanguan, W., Phongkanpai, V., & Tanaka, M. (2005). Antioxidative activity of caramelisation products and their preventive effect on lipid oxidation in fish mince. *Food Chem.*, 90(1–2), 231–239. DOI: [10.1016/j.foodchem.2004.03.045](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.03.045)
- [16] Rufián-Henares, J., & Pastoriza, S. (2016). Browning: Non-enzymatic browning.
- [17] Eskin, N. M., & Shahidi, F. (2012). *Biochemistry of foods* (3rd ed.). Academic Press.
- [18] Jain, D., Wang, J., Liu, F., Tang, J., Bohnet, S. (2017). Application of non-enzymatic browning of fructose for heating pattern determination in microwave assisted thermal pasteurization system. *J. Food Eng.*, 210, 27–34. DOI: [10.1016/j.jfoodeng.2017.04.014](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.04.014)
- [19] Hwang, I. G., Kim, H. Y., Woo, K., Lee, J., Jeong, H. S. (2011). Biological activities of Maillard reaction products (MRPs) in a sugar–amino acid model system. *Food Chem.*, 126(1), 221–227. DOI: [10.1016/j.foodchem.2010.10.103](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.10.103)
- [20] Lertittikul, W., Benjakul, S., & Tanaka, M. (2007). Characteristics and antioxidative activity of Maillard reaction products from a porcine plasma protein–glucose model system as influenced by pH. *Food Chem.*, 100(2), 669–677. DOI: [10.1016/j.foodchem.2005.09.085](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.09.085)
- [21] Coca, M., Teresa Garcı, M., González, G., Peña, M., Garcı, J.A. (2004). Study of coloured components formed in sug ar beet processing. *Food Chem.*, 86(3), 421–433. DOI: [10.1016/j.foodchem.2003.09.017](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2003.09.017)
- [22] Hu, S., Yin, J., Nie, Sh., Wang, J., Glyn, O.Ph., Xie, M., Cui, S. W. (2016). In vitro evaluation of the antioxidant activities of carbohydrates. *Bioact. Carbohydr. Diet. Fibre*, 7(2), 19–27. DOI: [10.1016/j.bcdf.2016.04.001](https://doi.org/10.1016/j.bcdf.2016.04.001)
- [23] Lee, G., & Lee, C. (1997). Inhibitory effect of caramelisation products on enzymic browning. *Food Chem.*, 60(2), 231–235. DOI: [10.1016/S0308-8146\(96\)00325-1](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(96)00325-1)
- [24] Vollmuth, T. A. (2018). Caramel color safety—an update. *Food Chem. Toxicol.*, 111, 578–596. DOI: [10.1016/j.fct.2017.12.004](https://doi.org/10.1016/j.fct.2017.12.004)
- [25] Brudzynski, K., & Miotto, D. (2011). Honey melanoidins: Analysis of the compositions of the

- high molecular weight melanoidins exhibiting radical-scavenging activity. *Food Chem.*, 127(3), 1023–1030.
DOI: [10.1016/j.foodchem.2011.01.075](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.01.075)
- [26] El-Ghorab, A. H., Ashraf, I., Muhammad Anjum, F., Shaaban, H., El-massry, Kh., Farouk, A. (2010). The effect of pH on flavor formation and antioxidant activity of amino acid and sugars interaction products. *J. Appl. Sci. Res.*, 5(2), 131–139.
- [27] Rahardjo, M., Sihombing, M., & Anggraeni, M. (2020). Color development and antioxidant activity in honey caramel. In *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*. IOP Publishing. DOI: [10.1088/1755-1315/443/1/012041](https://doi.org/10.1088/1755-1315/443/1/012041)
- [28] Echavarría, A., Pagán, J., & Ibarz, A. (2013). Antioxidant activity of the melanoidin fractions formed from D-glucose and D-fructose with L-asparagine in the Maillard reaction. *Sci. Agropecu.*, 4(1), 45–54.
DOI: [10.17268/sci.agropecu.2013.01.05](https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2013.01.05)
- [29] Tsai, P.-J., Yu, T., Chen, Sh., Liu, Ch., Sun, Y. (2009). Interactive role of color and antioxidant capacity in caramels. *Food Res. Int.*, 42(3), 380–386. DOI: [10.1016/j.foodres.2009.01.006](https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.01.006)
- [30] Brenna, O. V., Ceppi, E. L., & Giovannelli, G. (2009). Antioxidant capacity of some caramel-containing soft drinks. *Food Chem.*, 115(1), 119–123. DOI: [10.1016/j.foodchem.2008.11.059](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.11.059)
- [31] Chawla, S., Chander, R., & Sharma, A. (2009). Antioxidant properties of Maillard reaction products obtained by gamma-irradiation of whey proteins. *Food Chem.*, 116(1), 122–128. DOI: [10.1016/j.foodchem.2009.01.097](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.01.097)
- [32] Phongkanpai, V., Benjakul, S., & Tanaka, M. (2006). Effect of pH on antioxidative activity and other characteristics of caramelization products. *J. Food Biochem.*, 30(2), 174–186. DOI: [10.1111/j.1745-4514.2006.00053.x](https://doi.org/10.1111/j.1745-4514.2006.00053.x)
- [33] Payet, B., Shum Cheong Sing, A., & Smadja, J. (2005). Assessment of antioxidant activity of cane brown sugars by ABTS and DPPH radical scavenging assays: Determination of their polyphenolic and volatile constituents. *J. Agric. Food Chem.*, 53(26), 10074–10079.
DOI: [10.1021/jf0517703](https://doi.org/10.1021/jf0517703)
- [34]]Amin, N. A. M., Mustapha, W. A. W., Maskat, M. Y., & Wai, H. C. (2010). Antioxidative activities of palm sugar-like flavouring. *Open Food Sci. J.*, 4(1), 23–29.
DOI: [10.2174/1874256401004010023](https://doi.org/10.2174/1874256401004010023)
- [35] Woo, K. S., Kim, H., Hwang, I., Lee, S., Jeong, H. (2015). Characteristics of the thermal degradation of glucose and maltose solutions. *Prev. Nutr. Food Sci.*, 20(2), 102–108.
DOI: [10.3746/pnf.2015.20.2.102](https://doi.org/10.3746/pnf.2015.20.2.102)
- [36] Kocadağlı, T., & Gökmen, V. (2019). Caramelization in foods: A food quality and safety perspective.
- [37] Chen, H., & Gu, Z. (2014). Effect of ascorbic acid on the properties of ammonia caramel colorant additives and acrylamide formation. *J. Food Sci.*, 79(9), C1678–C1682.
DOI: [10.1111/1750-3841.12560](https://doi.org/10.1111/1750-3841.12560)
- [38] Linner, R. T. (1970). Caramel color: a new method of determining its color hue and tinctorial power. In *Proc. Soc. Soft Drink Tech. Annu Meet* (pp. 63-72).
- [39] El Hosry, L., Elias, V., Chamoun, V., Halawi, M., Cayot, P., Nehme, A., & Bou-Maroun, E. (2025). Maillard reaction: Mechanism, influencing parameters, advantages, disadvantages, and food industrial applications: A review. *Foods*, 14, 1881.
DOI: [10.3390/foods14111881](https://doi.org/10.3390/foods14111881)
- [40] Schab, D., Zahn, S., & Rohm, H. (2021). Development of a caramel-based viscoelastic reference material for cutting tests at different rates. *Mater.*, 14, 3798.
DOI: [10.3390/ma14143798](https://doi.org/10.3390/ma14143798)
- [41] Luna, M. P., & Aguilera, J. M. (2014). Kinetics of colour development of molten glucose, fructose and sucrose at high temperatures. *Food Biophys.*, 9(1), 61–68. DOI: [10.1007/s11483-013-9317-0](https://doi.org/10.1007/s11483-013-9317-0)
- [42] Barra, G. (2004). *The rheology of caramel*. Doctoral dissertation, University of Nottingham.
- [43] Barra, G., & Mitchell, J. R. (2013). The rheology of caramel. *Curr. Nutr. Food Sci.*, 9(1), 52–61.
DOI: [10.2174/1573401311309010005](https://doi.org/10.2174/1573401311309010005)

*Research Article***Investigation of physicochemical, rheological and sensory characterization of caramel produced from fructose****Ehsan Firoozi¹, Akram Sharifi^{2*}, Milad Pero³**

1. Master, Department of Food Science and Technology, Qa.C., Islamic Azad University, Qazvin, Iran.

2*. Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Qa.C., Islamic Azad University, Qazvin, Iran.

3. PhD in Food Engineering, Zar Grain Refinery, Farhikhtegan Zarnam Industrial & Research Group, Karaj, Iran

(Received: 9 July 2025, Received in revised form: 11 August 2025, Accepted: 11 August 2025)

Introduction: The application of food colorants is a crucial aspect of modern food processing, serving to enhance visual appeal, compensate for color loss during processing, and ensure product color uniformity. Among these, caramel color is one of the most widely used due to its broad color range—from light yellow to dark brown—along with 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. Through its involvement in Maillard and dehydration reactions, fructose-based caramel can develop desirable coloration, antioxidant activity, and functional properties suitable for various 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, leading to increased reliance on imports. This study aimed to produce caramel using four different formulations of fructose under controlled thermal conditions and to evaluate 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 food industry applications.

Results and discussion: The experimental findings demonstrated that the caramelization method significantly affected 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, Method 2 exhibited the lowest browning index, with its higher concentrations of ammonia and

* Corresponding author: asharifi@iau.ac.ir

sulfuric acid contributing to reduced browning. These results suggest that acidic conditions inhibit browning, whereas alkaline conditions promote it by enhancing Maillard and caramelization reactions. In terms of reducing power, there were no statistically significant differences among 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. Higher pH conditions favor the formation of enediol anions, thereby enhancing the reducing capacity of the caramel matrix. Additionally, hydroxymethylfurfural (HMF) content differed significantly among the 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 sample exhibited 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 Method 2 exhibited the highest chroma (21.81) and total color difference ($\Delta E = 45.284$), whereas the control and Method 4 displayed 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 processing conditions to achieve superior physicochemical and sensory qualities in caramel products.

Conclusions: 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*

How to cite this article:

Firoozi, E., Sharifi, A., & Pero, M. (2025). Investigation of physicochemical, rheological and sensory characterization of caramel produced from fructose. *Innovative Food Technologies*, 12(4), 395-414.
DOI: <http://dx.doi.org/10.22104/IFT.2025.7724.2224>