[ Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2024-04-20 ]

[ DOR: 20.1001.1.22518517.1394.5.17.4.7 ]

[ DOI: 10.18869/acadpub.jcpp.5.17.43 ]

# بررسی سینتیک تخریب رنگ رب گوجه‌فرنگی در طی فرایند حرارتی و مدل‌سازی این تغییرات با روش سطح پاسخ

**محمد گنجه[۱*]، سید مهدی جعفری[۲] و سجاد قادری[۳]**

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۲/۵ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱/۹)


## چکیده

**رنگ از فاکتورهای مهم کیفی محصولات فرایند شدهٔ گوجه‌فرنگی مانند رب می‌باشد و به شدت تحت تأثیر فرایند حرارتی قرار می‌گیرد. هدف اصلی در این پژوهش، ارزیابی سینتیک تخریب رنگ رب در طی فرایند حرارتی با استفاده از معادله آرنیوس و بررسی روند این تغییرات با استفاده از روش سطح پاسخ بود. برای این منظور، رب گوجه‌فرنگی در سه دمای ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سلسیوس به‌مدت ۲۵ تا ۱۰۰ دقیقه تحت فرایند قرار گرفت و با استفاده از سه شاخص اصلی رنگ شامل L، a و b، نسبت a/b، اختلاف رنگ کلی (TCD)، شاخص اشباعیت (SI) و زاویه هیو (HU) تعیین شد. سینیتیک تخریب این پارامترها با استفاده از معادله آرنیوس ارزیابی شده و روند تغییرات آنها با روش سطح پاسخ بررسی و مدل‌سازی شد. همهٔ پارامترها به‌جز TCA (مرتبه صفر)، از واکنش‌های مرتبه اول پیروی کردند. شاخص b با بالاترین و TCD و a/b با کمترین انرژی فعال‌سازی به‌ترتیب بیشترین و کمترین حساسیت به تغییرات دما را داشتند. بیشترین و کمترین نرخ تغییرات نیز به‌ترتیب مربوط به TCD و b بود. همهٔ شاخص‌ها تحت تأثیر فاکتورهای مستقل قرار می‌گرفتند (تأثیر دما بیشتر از زمان بود) و با استفاده از روش سطح پاسخ به‌خوبی قابل مدل‌سازی و پیش‌بینی بودند. به‌طورکلی، معادله آرنیوس جهت بررسی سینیتیک تغییرات رنگ رب گوجه‌فرنگی مناسب بوده و تأثیر مستقل و متقابل فاکتورهای زمان و دما با روش سطح پاسخ به‌خوبی قابل برآورد می‌باشد، به‌طوری‌که مدل‌های درجه دوم با دقت بالا (R2 > ۰/۹۵) قادر به پیش‌بینی متغیرها می‌باشند.**


**واژه‌های کلیدی: تخریب رنگ، رب گوجه‌فرنگی، معادله آرنیوس، روش سطح پاسخ**


۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۲. دانشیار گروه مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان- مرکز تحقیقات سلامت غلات، دانشگاه علوم پزشکی گلستان، گرگان

۳. دانشجوی دکترا، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه فردوسی مشهد

*. مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Ganjehmohammad@gmail.com

## مقدمه

رنگ یکی از فاکتورهای مهم کیفی محصولات فرایند شده‌ی گوجه‌فرنگی به‌خصوص رب می‌باشد که تأثیر بسیار زیادی روی پذیرش محصول توسط مشتری دارد. واکنش‌های زیادی در طی فرایند حرارتی اتفاق می‌افتند که رنگ محصولات را تحت تأثیر قرار می‌دهند. معمول‌ترین این واکنش‌ها تخریب رنگدانه‌ها به‌خصوص کاروتنوئیدها (لیکوپن، زانتوفیل و غیره) و کلروفیل و واکنش‌های قهوه‌ای شدن مانند مایلارد و اکسید شدن اسکوربیک اسید می‌باشد. هم‌چنین شرایط واکنش مانند pH، اسیدیته و دمای فرایند نیز بسیار تأثیر گذارند (۵).

در خط تولید رب گوجه‌فرنگی بعد از عملیات سورتینگ، عمل خردکرد محصول انجام می‌شود. گوجه‌های خرد شده از قیف خردکن وارد پری هیتر یا پیش گرمکن می‌شود. گوجه‌فرنگی خرد شده دراین قسمت بایستی حداقل ۸۵ تا ۹۰ درجه سلسیوس حرارت ببیند، این حرارت سبب آنزیم‌بری محصول می‌شود. سپس در دستگاه صافی آب گوجه جدا شده و در مخزن جمع‌آوری می‌شود. عمل تغلیظ در اواپراتورهای چند مرحله‌ای انجام می‌شود. اواپراتور تحت خلأ حدود ۵۸۰ میلی‌متر جیوه کار می‌کند. خلأ موجود باعث می‌گردد عمل تغلیظ در دمای پایین ۶۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس و با سرعت بالا انجام شود. این عمل تأثیر به‌سزایی در کیفیت محصول نهایی دارد. بریکس استاندارد برای رب اسپتیک‌ها تبریک ۲۸-۳۰ می‌باشد. به‌منظور سالم‌سازی میکروبی و افزایش زمان ماندگاری، رب بعد از تغلیظ وارد دستگاه پاستوریزاتور شده و دمای ۸۵ تا ۹۰ درجه سلسیوس روی آن اعمال می‌شود. بعد از پر کردن و در بندی، قوطی‌ها وارد تونل پاستوریزه می‌شوند. کل زمانی که قوطی در تونل سپری می‌کند حدوداً ۵۵ دقیقه می‌باشد که ۱۵ دقیقه آن مربوط به آب گرم (۹۵°C - ۹۰ ) و مابقی مربوط به آب سرد است (۱۹).

درصورتی‌که هدف تولید رب اسپتیک باشد محصول وارد دستگاه اسپتیک می‌شود که شامل دو قسمت استرلایزر و فیلر می‌باشد که به‌صورت پیوسته با هم کار می‌کنند. دستگاه استریلایزر سه مرحله گرم کردن (Heating)، نگهداری در دمای بالا (Holding) و سرد سازی (Cooling) دارد که در مرحله گرم کردن محصول بسته به ظرفیت کاری به دمای ۱۰۳ تا ۱۰۸ درجه سلسیوس رسیده و در لوله‌های نگهداری به‌مدت حداقل ۴ - ۲ دقیقه در این دما ثابت می‌ماند و بعد در مرحله سرد سازی به دمای ۳۴ - ۳۲ درجه سلسیوس می‌رسد. محصول نهایی (استرلیزه شده) به‌صورت سرد به قسمت فیلر انتقال داده می‌شود. این عمل باعث حفظ کیفیت، خصوصاً رنگ محصول می‌گردد (۲۳).

در محصولات تغلیظ شده گوجه‌فرنگی مهم‌ترین فرایند تخریب رنگدانه قرمز لیکوپن و ایزومراسیون آن از حالت ترانس به سیس می‌باشد که باعث تغییر رنگ محصول می‌شود (۲۱ و ۳۶). در ضمن حضور کلروفیل نیز که ممکن است در اثر خرد شدن گوجه‌های نارس وارد خط تولید شده باشد با تولید فئوفیتین در اثر حرارت باعث ایجاد رنگ سبز زیتونی نامطلوب در محصول می‌شود. رینولدز پلیمریزاسیون فنول‌ها را نیز از عوامل کاهش رنگ در طی فرایند حرارتی ذکر کرد (۳۴).

رنگ معمولاً با سه مشخصه L، a و b معرفی و تعیین می‌شود. تعیین رنگ با استفاده از این سه مشخصه اصلی در صنعت غذا و به‌خصوص در محصولاتی مانند رب گوجه‌فرنگی که دارای رنگ بالا می‌باشند مناسب‌ترین روش می‌باشد (۱۸)، هرچند برای محصولات دارای رنگ روشن چندان مفید نیست (۶). فاکتور L نمایانگر میزان روشنایی و براقیت محصول است و از ۱۰۰ برای سفید کامل تا صفر برای سیاه مطلق درجه‌بندی می‌شود. مقادیر مثبت a نشانگر قرمزی و مقادیر منفی آن میزان سبز بودن محصول را نشان می‌دهد، هم‌چنین مقادیر مثبت b میزان رنگ زرد و مقادیر منفی آن نشانگر مقدار رنگ آبی محصول است (۱۱). از پارامترهای دیگری که از این سه پارامتر اصلی مشتق می‌شوند می‌توان به اختلاف رنگ کل (Total Colour Difference (TCD))، شاخص اشباعیت (Saturation Index (SI)) یا کروما که شاخصی از اشباعیت رنگ و شدت آن می‌باشد، نسبت a/b و زاویه هیو(HU) اشاره



[ Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2024-04-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.22518517.1394.5.17.4.7 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jcpp.5.17.43 ]

کرد (۱۱).

نسبت a/b به‌عنوان مشخصه کیفیت رنگ محصولات حاصل از گوجه‌فرنگی به‌کار می‌رود. مقادیر ۲ و بالاتر نشان دهنده‌ی کیفیت عالی رنگ محصول و مقادیر کمتر از ۱/۸۰ غیر قابل قبول می‌باشد (۶). زاویه‌ی هیو از دیگر پارامترهایی است که به‌طور گسترده در ارزیابی رنگ محصولات غذایی استفاده می‌شود. مقدار صفر یا ۳۶۰ درجه این زاویه بیانگر ته‌رنگ قرمز محصول می‌باشد درحالی‌که مقادیر ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ درجه این زاویه به‌ترتیب بیانگر ته‌رنگ زرد، سبز و آبی است (۳۰).

معادله ارنیوس برای بیان ریاضی تأثیر دما بر سرعت واکنش شیمیایی و اساس همه پیش‌بینی‌هایی که برای محاسبه ثابت سرعت واکنش‌ها به‌کار می‌رود، استفاده می‌شود. براساس معادله آرنیوس افزایش ناچیز دما سبب افزایش قابل توجهی در ثابت سرعت واکنش می‌شود. اسوانته آرنیوس اولین کسی بود که نشان داد این رابطه تقریباً برای همه انواع واکنش‌های شیمیایی کاربرد دارد. پدرسچی و همکارانش به بررسی تغییرات رنگ سیب‌زمینی در طی سرخ کردن پرداختند و عنوان کردند که پارامترهای رنگی مورد نظر از سینتیک نوع اول پیروی می‌کنند و از معادله آرنیوس می‌توان برای پیش‌بینی متغیرهای رنگی استفاده کرد (۳۲). بایک و همکاران با استفاده معادله‌های سینتیک نوع اول و دوم و معادله آرنیوس با موفقیت به مدل‌سازی روند تخریب پارامترهای رنگی در طی سرخ کردن توفو (Tofu) پرداختند که بر این اساس پارامترهای a، b و TCD همگی با انرژی اکتیواسیون ۱۶۵ – ۷۶ کیلوژول بر مول از سینتیک نوع اول پیروی می‌کردند (۱۰). لائو و همکاران به بررسی تغییرات رنگ مارچوبه در طی آنزیم‌بری با استفاده از حمام بخار در دمای ۹۸ – ۷۰ درجه سلسیوس پرداخت. این محققان ضمن بیان اینکه این تغییرات با انرژی اکتیواسیون برابر با ۵۴/۸ کیلوژول بر مول از سینتیک نوع اول پیروی می‌کند، علت این کاهش رنگ را نیز تخریب کلروفیل‌ها دانستند (۲۵). از جمله محققین دیگری که جهت بررسی سینتیک تخریب رنگ در طی فرایند حرارتی از معادله آرنیوس استفاده کرده‌اند می‌توان به چوتین تراسی و نومهورم برای پوره آناناس (۱۵)، احمد و راماسماوی در طی فرایند حرارتی رب خرما ( Date paste) (۱) و جو ساه و همکاران در مورد میوه شاه‌توت (۴۰) اشاره کرد.

روش سطح پاسخ (RSM) مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری است که در مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل مسائلی که متغیر پاسخ تحت تأثیر چندین متغیر مستقل قرار دارد به‌کار برده می‌شود. در این روش کلیه ضرایب مدل رگرسیون درجه دوم و اثر متقابل فاکتورها، قابل برآورد هستند (۸ و ۳۱). هدف دیگر درک چگونگی تغییرات پاسخ در یک مسیر مشخص به‌وسیله تنظیم متغیرهای طراحی است. سطح پاسخ را می‌توان به‌صورت گرافیکی تجسم کرد. گراف‌ها کمک می‌کنند تا فرورفتگی‌ها، برآمدگی‌ها و خطوط مرزی سطح پاسخ بهتر دیده شوند.

موفقیت روش سطح پاسخ در بهینه‌سازی و مدل‌سازی فرایندهای صنایع غذایی توسط محققان زیادی تأیید شده است (۲۰). تیواری و همکاران جهت مدل‌سازی تخریب رنگ آب پرتقال در طی فرایند کردن آن با ازون از روش سطح پاسخ استفاده کردند. این محققین اعلام کردند که اثر ترکیبی متغیرهای فرایند (شامل سرعت جریان گاز ازون، غلظت ازون و زمان فرایند) روی پارامترهای رنگ (شامل L، a، b، SI، HU و TCD) که با استفاده از روش‌های معمول قابل برآورد نیست، با استفاده از روش سطح پاسخ به‌راحتی قابل پیش‌بینی است (۴۱).

هدف از این پژوهش بررسی سینتیک و تعیین درجه واکنش تغییرات پارامترهای رنگ رب گوجه‌فرنگی و هم‌چنین ارزیابی میزان حساسیت هریک از این پارامترها نسب به تغییرات دما و زمان با استفاده از معادله آرنیوس و تعیین ثابت‌های این معادله در طی فرایند حرارتی می‌باشد. به‌علاوه میزان تغییرات پارامترهای رنگ مورد نظر با استفاده از روش سطح پاسخ مدل‌سازی شده و میزان دقت آنها با نتایج ازمایشگاهی مقایسه خواهد شد. با در اختیار داشتن این ضرایب و مدل‌ها قادر به دست‌یابی به پیش‌بینی مناسب و نزدیک به واقعیتی از مقادیر فاکتورهای رنگ محصول با توجه به زمان و دمای اعمالی در



[ Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2024-04-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.22518517.1394.5.17.4.7 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jcpp.5.17.43 ]

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی اولیه رب گوجه‌فرنگی

| فاکتور | میزان | فاکتور | میزان |
|---|---|---|---|
| بریکس | °B۲۷ | نمک | ٪۲/۱ |
| رنگ (a/b) | ۲/۱۵ | pH | ۴/۳ |
| اسیدیته (٪ اسید سیتریک) | ۱/۷ g citric acid/۱۰۰ g sample | قوام بوستویک | ۷/۱cm/۳۰sec |

طی فرایند خواهیم بود و می‌توانیم فرایند را با توجه به میزان حساسیت هریک از فاکتورها به دما و زمان و اهمیتی که هر فاکتور در آن فرایند خاص برای ما دارند تنظیم نماییم.

## مواد و روش‌ها

### تهیه نمونه و تعیین خصوصیات اولیه آن

نمونه‌های رب گوجه‌فرنگی از یک بچ تولید در تابستان سال ۱۳۹۰ از کارخانه صنایع غذایی کامنوش واقع در شهر گرگان تهیه و جهت انجام آزمون‌ها استفاده شد. با توجه به این‌که قسمت اعظم فرایند حرارتی در طی تولید رب گوجه روی محصول تقریباً تغلیظ شده (در طی فرایند تغلیظ در اواپراتورها) انجام می‌شود و هم‌چنین وجود فرایند پاستوریزاسیون بعد از تغلیظ در پاستوریزاتور لوله‌ای و بعد از دربندی قوطی در تونل پاستوریزه و به‌علاوه فرایند حرارتی اعمالی در استرلیزاتور (در صورت تولید رب اسپتیک)، جهت انجام این تحقیق از رب گوجه به‌جای عصاره و یا محصولات حد واسط دیگر استفاده شد، تا میزان تأثیر حرارت و زمان‌بر آن مورد آزمون قرار گیرد. مشخصات فیزیکوشیمیایی نمونه اولیه (که در جدول ۱ خلاصه شده است) طبق استاندارد ملی ایران به شماره ۷۶۱ تعیین شد.

### ارزیابی تغییرات رنگ

جهت ارزیابی تخریب حرارتی رنگ محصول از حمام بخار استفاده شد و نمونه‌ها در ظروف شیشه‌ای درب‌دار و در دماهای ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند و در زمان‌های ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ دقیقه بر روی نمونه‌ها آنالیز رنگ انجام شد.

بدین منظور ابتدا نمونه‌ها بر اساس روش معمول اندازه‌گیری رنگ در کارخانه‌های تولید رب و غلظتی که برای کار با دستگاه رنگ‌سنجی گاردنر لازم است با استفاده از آب مقطر تا بریکس ۱۲/۵ رسانده شدند، به گونه‌ای که عاری از هر گونه حباب هوا باشند و سپس رنگ نمونه‌ها با استفاده از دستگاه گاردنر (مدل LS2000 ساخت کشور ایتالیا) اندازه‌گیری شده و فاکتورهای L، a و b ثبت شد و سپس a/b و فاکتورهای TCD، SI و HU به‌ترتیب با استفاده از معادله‌های ۱، ۲ و ۳ اندازه‌گیری گردید. در طی انجام آزمون، نمونه‌ها با سرعت یکنواخت هم می‌خوردند تا از حرارت دیدن موضعی نمونه‌ها جلوگیری شود. در کنار حمام بخار ظرف آب سرد صفر درجه سلسیوس فراهم شده بود و بلافاصله پس از فرایند در زمان‌های تعیین شده نمونه‌ها از آب گرم خارج شده و در این آب سرد قرار می‌گرفتند تا از فرایند اضافی ممانعت شود.

$$TCD = ((L_0 - L)^2 + (a_0 - a)^2 + (b_0 - b)^2)^{\frac{1}{2}} \quad (۱)$$

$$SI = (a^2 + b^2)^{\frac{1}{2}} \quad (۲)$$

$$\text{Hue angle} = \tan^{-1}\frac{a}{b} \quad (۳)$$

### بررسی سینتیک تخریب رنگ

جهت بررسی سینتیک تخریب رنگ نمونه‌ها درجه واکنش برای هریک از پارامترهای رنگ تعیین شد. به این منظور مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی هر یک از این شاخص‌ها در مقابل زمان و با استفاده از معادلات درجه صفر (معادله ۴) و درجه اول (معادله ۵) رسم شد و سپس با استفاده از آنالیز رگرسیون، درجه مناسب (با استفاده از ضریب همبستگی) هریک انتخاب گردید.



[ Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2024-04-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.22518517.1394.5.17.4.7 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jcpp.5.17.43 ]

هم‌چنین با استفاده از شیب خط مستقیم رسم شده، ثابت سرعت یا نرخ تغییرات پارامترها تعیین شد. جهت تعیین تأثیر درجه حرارت روی مقادیر ثابت سرعت از معادله آرنیوس (معادله ۶) استفاده شد:

$$C = C_0 + K_0 t \quad (۴)$$

$$C = C_0 \exp(k_1 t) \quad (۵)$$

$$\mathrm{Ln}\, k = \mathrm{Ln}\, k_0 - \frac{E_a}{RT} \quad (۶)$$

در معادله‌های ۴ و ۵، C و $C_0$ به‌ترتیب مقدار اندازه‌گیری شده برای پارامتر مورد نظر در زمان t و مقدار اولیه آن پارامتر می‌باشد؛ t زمان فرایند حرارتی و $K_0$ ($min^{-1}$) و $K_1$ به‌ترتیب ثابت سرعت واکنش‌های درجه صفر و درجه اول می‌باشند. در معادله شماره ۶، $K_0$ فاکتور پیش‌نمایی ($min^{-1}$)، $E_a$ انرژی فعال‌سازی ($kJ.mol^{-1}$)، R ثابت جهانی گازها ($kJ.(mol.°k)^{-1}$) و T دمای مطلق (K) می‌باشد. میزان $E_a$ با استفاده از شیب و میزان $k_0$ با استفاده از عرض از مبدأ خط مستقیم حاصل از رسم ln K در مقابل 1/T به‌دست آمد.

### مدل‌سازی با استفاده از روش سطح پاسخ

با توجه به تعدد متغیرهای خروجی مورد نظر و هم‌چنین اهمیت تعیین اثرات هریک از متغیرهای مستقل و اثرات متقابل آنها در سطوح متنوع مورد نظر و به‌علاوه توانایی مدل‌های سطح پاسخ در ارائه گراف‌های ملموس که کمک می‌کنند تا تغییرات خطوط مرزی سطح پاسخ بهتر دیده شوند، این روش مدل‌سازی انتخاب شد . بدین منظور آزمون‌ها انجام شده و در نرم افزار MINITAB وارد شدند و سپس تأثیر متغیرهای مستقل آزمایش شامل زمان در ۴ سطح و دمای فرایند در ۳ سطح بر روی پارامترهای وابسته که شامل شاخص‌های رنگی L، a، b، a/b، TCD، SI و HU بود، با استفاده از روش سطح پاسخ مورد ارزیابی قرار گرفته و با استفاده از این روش آنالیز داده‌ها و مدل‌سازی رگرسیونی آنها انجام شد. در روش RSM معمولاً از رابطه درجه دوم استفاده می‌شود. در این روش برای هر متغیر وابسته مدلی تعریف می‌شود که آثار اصلی و متقابل فاکتورها را بر روی آن متغیر بیان می‌نماید. مدل چند متغیره به‌صورت معادله شماره ۷ می‌باشد. از نرم افزار MINITAB 16 جهت تجزیه تحلیل اطلاعات و رسم نمودارها ی مربوط به روش سطح پاسخ استفاده شد.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{2} \beta_i X_i + \sum_{i=1}^{2} \beta_{ij} X_i^2 + \sum_i \sum_{j=i+1} \beta_{ij} X_i X_j \quad (۷)$$

ملاک و معیار انتخاب مدل مناسب ضریب همبستگی ($R^2$) و بعد از آن انحراف معیار میانگین(E) می‌باشد (۷). E با استفاده از معادله شماره ۸ به‌دست می‌آید:

$$E(\%) = \frac{1}{n_e} \sum_{i=1}^{n} \left\| \frac{V_E - V_P}{V_E} \right\| \times 100 \quad (۸)$$

که E انحراف معیار میانگین، $n_e$ تعداد آزمایشات انجام شده، $V_E$ نتایج به‌دست آمده در آزمایشات و $V_P$ مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل می‌باشد.

### طرح آماری

جهت بررسی اثر تیمارها از آزمون فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی حداقل در سه تکرار و به‌منظور مقایسه میانگین‌ها از آزمون دانکن در سطح ۵ درصد استفاده شد. هم‌چنین نرم افزار SPSS 16 جهت آنالیز آماری و مقایسه میانگین‌ها و نرم‌افزار Excel 2007 برای رسم نمودارها و تعیین ضرایب همبستگی و روابط رگرسیونی بین متغیرها به‌کار برده شد.

## نتایج و بحث

### بررسی سینتیک تغییرات رنگ در طی فرایند حرارتی

در جدول ۲ مقادیر اندازه‌گیری شده برای هریک از پارامترهای رنگی مورد نظر در تیمارهای مختلف دما و زمان را مشاهده می‌کنیم. رنگ رب گوجه‌فرنگی به مرور زمان در طی فرایند حرارتی و هم‌چنین با افزایش دما به سمت تیرگی تمایل پیدا می‌کند که این امر را می‌توان در شکل ۱- الف که کاهش میزان L را که شاخص روشنایی و براقیت محصول است نشان می‌دهد، به وضوح مشاهده کرد. همان‌طورکه در شکل مشخص



[ Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2024-04-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.22518517.1394.5.17.4.7 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jcpp.5.17.43 ]

**جدول ۲. میزان پارامترهای رنگ اندازه‌گیری شده در تیمارهای مختلف**

| تیمار | a | b | L | a/b | HU | TCD | SI |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۲۵ min-۶۰°C | ۱/۲۶ l* | ۰/۶۱ l | ۲۷/۷ l | ۲/۰۸ k | ۲۵/۶ a | ۰/۲۲ a | ۱/۴۰ l |
| ۵۰ min -۶۰°C | ۱/۲۳ j | ۰/۶۰ j | ۲۶/۹ i | ۲/۰۵ j | ۲۶/۰ b | ۱/۰۱ d | ۱/۳۷ j |
| ۷۵ min -۶۰°C | ۱/۱۹ h | ۰/۵۹ i | ۲۶/۵ h | ۱/۹۹ h | ۲۶/۶ d | ۱/۳۸ e | ۱/۳۳ h |
| ۱۰۰ min -۶۰°C | ۱/۱۵ f | ۰/۵۹ g | ۲۵/۹ f | ۱/۹۳ f | ۲۷/۳ f | ۱/۹۴ g | ۱/۲۹ f |
| ۲۵ min -۷۰°C | ۱/۲۳ k | ۰/۶۰ k | ۲۷/۵ k | ۲/۰۵ j | ۲۶/۰ b | ۰/۴۲ b | ۱/۳۷ k |
| ۵۰ min -۷۰°C | ۱/۱۵ g | ۰/۵۹ f | ۲۶/۴ g | ۱/۹۵ g | ۲۶/۸ e | ۱/۵۳ f | ۱/۲۹ g |
| ۷۵ min -۷۰°C | ۱/۰۷ e | ۰/۵۸ e | ۲۵/۷ e | ۱/۸۴ d | ۲۸/۵ g | ۲/۱۷ h | ۱/۲۱ e |
| ۱۰۰ min -۷۰°C | ۰/۹۶ c | ۰/۵۶ d | ۲۴/۹ c | ۱/۷۱ b | ۳۰/۳ i | ۲/۹۶ j | ۱/۱۱ c |
| ۲۵ min -۸۰°C | ۱/۲۰ i | ۰/۵۹ h | ۲۶/۹ j | ۲/۰۰ i | ۲۶/۵ c | ۰/۹۸ c | ۱/۳۴ i |
| ۵۰ min -۸۰°C | ۱/۰۱ d | ۰/۵۳ c | ۲۵/۴ d | ۱/۹۱ e | ۲۹/۲ h | ۲/۵۱ i | ۱/۱۵ d |
| ۷۵ min -۸۰°C | ۰/۸۸ b | ۰/۵۱۲ b | ۲۳/۱ b | ۱/۷۳ c | ۳۰/۰ j | ۴/۸۰ k | ۱/۰۲ b |
| ۱۰۰ min -۸۰°C | ۰/۶۹ a | ۰/۴۴ a | ۲۱/۳ a | ۱/۵۷ a | ۳۲/۴ k | ۶/۶۶ l | ۰/۸۲ a |

*: حروف مشابه در یک ستون بدین معناست که اعداد از نظر آماری در سطح ۵ درصد با هم اختلاف معنی‌دار ندارند.

شاخص اصلی رنگ شامل (L، a و b)، اختلاف رنگ کلی (TCD)، شاخص اشباعیت (SI)، زاویه هیو (HU)

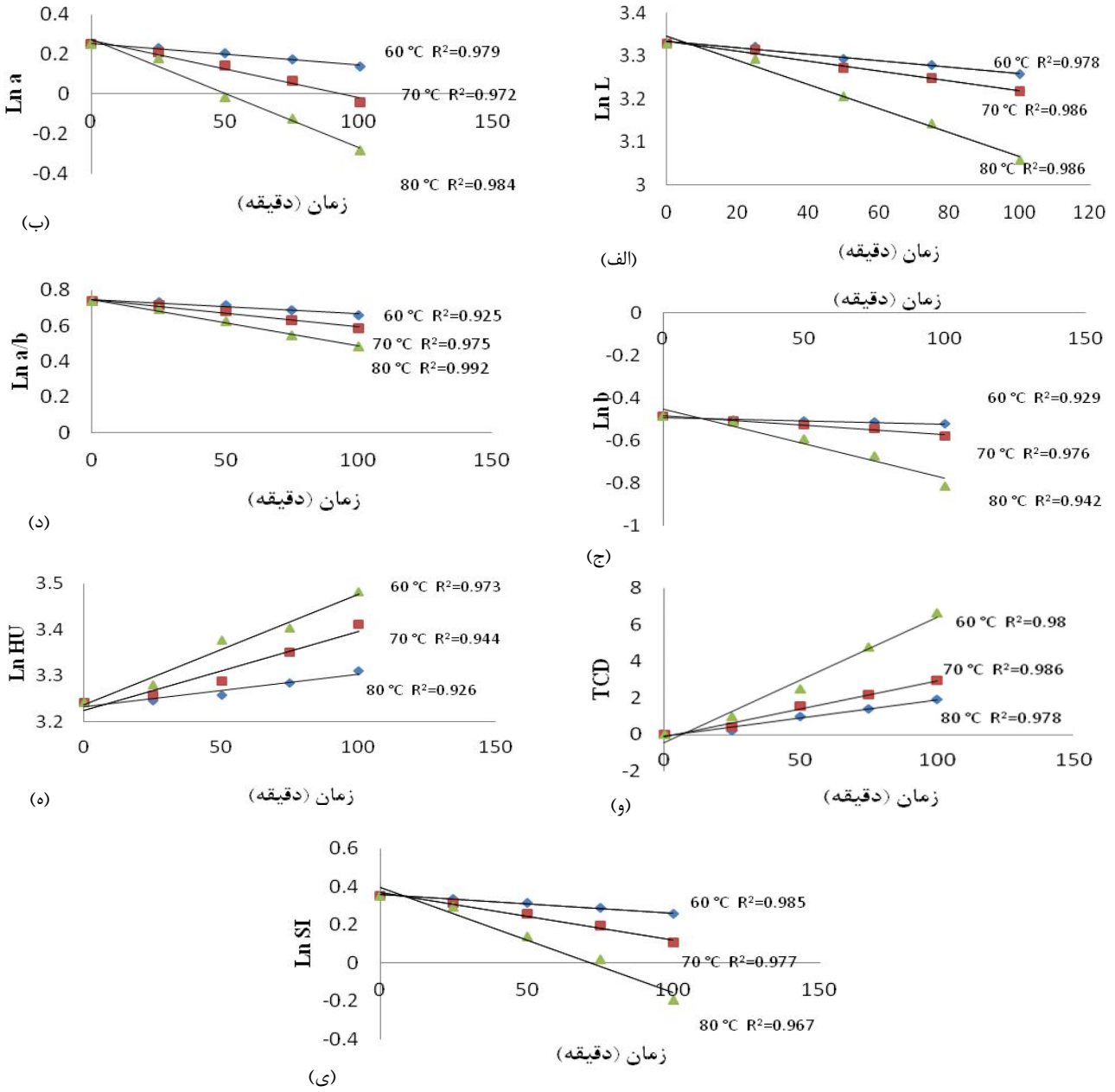
است میزان تخریب و کاهش این شاخص از سینتیک نوع اول پیروی می‌کند. ضرایب همبستگی بالاتر از ۰/۹۷ در هر سه دمای مورد بررسی تأییدی بر انتخاب انجام شده می‌باشد. پیروی این فاکتور از سینتیک نوع اول در تحقیقات زیاد دیگری از جمله مطالعه تغییرات رنگ پوره آناناس (۱۵)، خشک کردن هوای داغ کیوی (۳۰)، خشک کردن هوای داغ و مایکروویو کیوی (۲۸)، پوره فلفل سبز (۲)، پالپ سیب، هلو و پالم (۲۷)، پوره هلو (۱۷)، پوره گلابی (۲۴) و زیتون سبز (۳۷) نیز تأیید شده است.

پارامتر a شاخصی از قرمزی محصول می‌باشد و در گوجه‌فرنگی و محصولات حاصل از آن مخصوصاً رب گوجه بسیار حائز اهمیت می‌باشد. مسئولیت اصلی ایجاد رنگ قرمز در گوجه‌فرنگی بر عهده‌ی لیکوپن و زانتوفیل می‌باشد که کارتنوئیدهایی حساس به حرارت هستند و در طی فرایند حرارتی از بین رفته و باعث کاهش قرمزی محصول می‌شوند. بوسکوویک کاهش رنگ قرمز در رب گوجه را به ایزومراسیون لیکوپن در طی فرایند حرارتی نسبت داد (۱۳) و استوارتز و لورنزو تجزیه کلروفیل به فئوفیتین و در نتیجه تیره‌تر شدن رب را در کاهش این شاخص مؤثر دانستند (۳۸ و ۳۹). همان‌طورکه در شکل ۱- ب مشخص است با افزایش دما و زمان فرایند با کاهش این شاخص مواجه هستیم و سینتیک تجزیه آن نیز از درجه اول پیروی می‌کند که ضرایب همبستگی بالا (بالاتر از ۰/۹۷) شاهدی بر صحت انتخاب درجه واکنش می‌باشد. از جمله نتایج مشابه در مورد درجه واکنش سینتیک تخریب این شاخص، در محصولاتی مانند اسفناج (۳۹)، زیتون سبز (۳۷)، آب انگور (۳۵)، پوره فلفل سبز (۲۴) و آب گوجه خشک شده (۲۶) مشاهده شده است.

پارامتر b نیز که شاخصی از میزان زردی نمونه است در طی فرایند و با افزایش دما با کاهش مواجه می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۱- ج مشخص است روند تغییرات این شاخص نیز به‌خوبی و با ضریب همبستگی بالا با مدل سینتیکی درجه اول هم‌خوانی دارد و از این مدل پیروی می‌کند (ضریب همبستگی



[ Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2024-04-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.22518517.1394.5.17.4.7 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jcpp.5.17.43 ]




**شکل ۱. سینتیک تخریب حـرارتی پارامترهای رنگ L (الف)، a (ب)، b (ج)، a/b (د)، TCD (و)، SI (ی) و HU (ه) رب گوجه فرنگی شاخص اصلی رنگ شامل (L، a و b)، اختلاف رنگ کلی (TCD)، شاخص اشباعیت (SI)، زاویه هیو (HU)**

بین ۰/۹۲ تا ۰/۹۷). دلیلی که می‌توان برای کاهش ایـن پـارامتر آورد این است که ایزومراسیون کاروتنوئیدها که در طـی فراینـد حرارتی و با افزایش دما بیشتر هم می‌شود، باعث کـاهش رنـگ زرد این رنگدانه‌ها و در نتیجه محصول می‌شود (۱۵). از جملـه مطالعات دیگر که بـه نتـایج مشـابهی در مـورد درجـه سـینتیک تخریب این شاخص دست یافته‌اند می‌تـوان بـه خشـک کـردن هوای داغ کیـوی (۳۰)، پـوره آنانـاس (۱۵)، آب آنانـاس (۳۳)، پوره هلو (۲۴)، پوره مانگو (۴)، پـوره فلفـل سـبز (۲)، خشـک کردن هـوای داغ و مـایکروویو کیـوی (۲) و زیتـون سـبز (۳۷) اشاره کرد.

همانند دو پارامتر a و b نسبت آنهـا یعنـی a/b نیـز از نـوع سینتیک نوع اول می‌باشد (شکل ۱– د). ضرایب همبستگی بـالا



[ Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2024-04-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.22518517.1394.5.17.4.7 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jcpp.5.17.43 ]

[ Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2024-04-20 ]

[ DOR: 20.1001.1.22518517.1394.5.17.4.7 ]

[ DOI: 10.18869/acadpub.jcpp.5.17.43 ]

**جدول ۳. درجه واکنش و ثابت‌های معادله آرنیوس برای سینتیک تغییرات رنگ طی فرایند حرارتی رب گوجه‌فرنگی**

| پارامترهای رنگی | درجه واکنش | Ea (Kj/mol$^{-1}$) | $K_0$ (min$^{-1}$) | $\ln k_0$ (min$^{-1}$) | $R^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| L | ۱ | ۳۶/۴۴ | ۱۸/۴۵ | ۲/۹۲ | ۰/۹۹۹ |
| a | ۱ | ۳۹/۵۵ | ۲۱/۴۲ | ۳/۰۶ | ۰/۹۹ |
| b | ۱ | ۴۶/۶۸ | ۲۶/۰۳ | ۳/۲۶ | ۰/۹۸۶ |
| a/b | ۱ | ۳۰ | ۱۴/۰۵ | ۲/۶۴ | ۰/۹۹۱ |
| TCD | ۰ | ۲۹/۶۹ | ۱۷/۵۳ | ۲/۸۶ | ۰/۹۵۵ |
| SI | ۱ | ۳۹/۵۵ | ۲۱/۴۲ | ۳/۰۶ | ۰/۹۹ |
| Hue angle | ۱ | ۲۷/۱۰ | ۱۲/۵۷ | ۲/۵۳ | ۰/۹۸۲ |

شاخص اصلی رنگ شامل (L، a و b)، اختلاف رنگ کلی (TCD)، شاخص اشباعیت (SI)، زاویه هیو (HU)

بین ۰/۹۲۵ و ۰/۹۹۲ تأییدی بر مدل انتخاب شده می‌باشد. از جمله مطالعاتی که به نتایج مشابه دست یافته‌اند می‌توان به مطالعه تغییرات رنگ مارچوبه (۲۱) و نخودفرنگی (۳) اشاره کرد.

پارامتر TCD که نشان دهنده‌ی میزان تغییرات رنگ بعد از فرایند است (۱، ۲۲ و ۳۷) و می‌توان آن را یک شناساگر قابل اعتماد برای تأثیر فرایند بر رنگ کلی محصول دانست (۹) بر خلاف پارامترهای دیگر از سینتیک درجه صفر پیروی می‌کند (شکل۱- ی) و با افزایش دما شاهد افزایش میزان این شاخص هستیم. در هر سه دما ضریب همبستگی بالاتر از ۰/۹۷ می‌باشد که نشان دهنده‌ی صحت انتخاب درجه این شاخص می‌باشد. محمدی و همکاران در مورد خشک کردن هوای داغ کیوی (۳۰)، چوتین تراسی و نومهورم در پوره آناناس (۱۵)، ماشان در مورد خشک کردن مایکروویو و هوای داغ کیوی (۲) و هم‌چنین همین محقق در مطالعه تغییرات رنگ روغن آفتابگردان در طی سرخ کردن به نتایج مشابهی در مورد درجه این شاخص دست یافتند (۲۹).

همان‌طورکه از نام پارامتر شاخص اشباعیت نیز مشخص است، این فاکتور شاخصی از میزان اشباعیت رنگ می‌باشد و شدت رنگ زمینه را نشان می‌دهد (۱۲). این شاخص نیز با افزایش زمان و دمای فرایند با کاهش مواجه می‌شود و همان‌طورکه نمودار نشان می‌دهد (شکل ۱- و) با ضریب همبستگی بالا (۰/۹۶ - ۰/۹۸) از سینتیک نوع اول پیروی می‌کند. از جمله تحقیقاتی که به نتایج مشابه در مورد درجه این شاخص دست یافته‌اند می‌توان به مطالعه تغییرات رنگ کیوی در طی خشک کردن هوای داغ توسط محمدی و همکاران (۳۰) و هم‌چنین بررسی سینیتیک تخریب رنگ عصاره‌های سیب زمینی توسط رییس و زوالوس اشاره کرد (۱۶).

زاویه هیو در مواردی که محصول مورد مطالعه دارای یکی از رنگ‌های قرمز، نارنجی، زرد، سبز، آبی یا بنفش باشد بسیار مناسب می‌باشد (۳۰). این شاخص به‌طور گسترده‌ای برای بیان تغییرات رنگ گوجه‌فرنگی و محصولات آن استفاده می‌شود (۱۴). این شاخص نیز با پیروی از سینتیک درجه اول با افزایش در طی فرایند حرارتی همراه است (شکل۱- ه). در واقع با افزایش این پارامتر از رنگ قرمز محصول کاسته می‌شود و به سمت سبزی و زردی می‌گراید. ثابت‌های معادله آرنیوس شامل $\ln k_0$ و $E_a$ برای تمام پارامترها به همراه ضرایب همبستگی آنها در جدول ۳ ارائه شده است. براساس داده‌های جدول ۳ پارامتر رنگی b با بالاترین میزان $E_a$ بیشترین حساسیت را نسبت به تغییرات دما دارد ($E_a$ = ۴۶/۶۸ kj.mol$^{-1}$) و بعد از آن پارامترهای a و SI قرار دارند. کمترین حساسیت نیز مربوط به HU با انرژی اکتیواسیون ۲۷/۱ کیلو ژول بر مول می‌باشند.

در جدول ۴ میزان ثابت‌های معادله آرنیوس، در دو دامنه دمایی متفاوت مشاهده می‌شود. همانگونه که در این جدول مشخص است در رنج دمایی بالاتر در تمام پارامترها افزایش

**جدول ۴. ثابت‌های معادله آرنیوس برای سینتیک تغییرات رنگ طی فرایند حرارتی رب گوجه‌فرنگی در دو دامنه دمایی متفاوت**

| پارامترهای رنگی | درجه واکنش | دامنه دمایی (°C) | $K_0$ (min$^{1}$) | LN $K_0$ (min$^{-1}$) | Ea (KJ/mol$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|
| L | ۱ | ۷۰-۶۰ | ۱۷/۵۷ | ۲/۸۷ | ۶۷/۱۹ |
| | | ۸۰-۷۰ | ۱۹/۲۹ | ۲/۹۶ | ۷۱/۹۱ |
| a | ۱ | ۷۰-۶۰ | ۱۶/۸۷ | ۲/۸۳ | ۶۳/۳۹ |
| | | ۸۰-۷۰ | ۲۶/۱۴ | ۳/۲۶ | ۸۸/۸۳ |
| b | ۱ | ۷۰-۶۰ | ۱۹/۳۹ | ۲/۹۶ | ۷۲/۳۰ |
| | | ۸۰-۷۰ | ۳۲/۹۳ | ۳/۴۹ | ۱۰۹/۴۶ |
| a/b | ۱ | ۷۰-۶۰ | ۱۰/۶۷ | ۲/۳۷ | ۴۸/۲۵ |
| | | ۸۰-۷۰ | ۱۷/۵۷ | ۲/۸۷ | ۶۷/۱۹ |
| TCD | ۰ | ۷۰-۶۰ | ۲۵/۵۷ | ۳/۲۴ | ۳۶/۸۶ |
| | | ۸۰-۷۰ | ۹/۹۲ | ۲/۲۹ | ۷۹/۸۱ |
| SI | ۱ | ۷۰-۶۰ | ۱۶/۸۷ | ۲/۹۶ | ۶۳/۳۹ |
| | | ۸۰-۷۰ | ۲۶/۱۴ | ۳/۲۶ | ۸۸/۸۳ |
| HU | ۱ | ۷۰-۶۰ | ۲۸/۵۴ | ۳/۳۵ | ۵۹/۳۹ |
| | | ۸۰-۷۰ | ۲۹/۸۶ | ۳/۴۰ | ۶۳/۰۱ |

شاخص اصلی رنگ شامل (L، a و b)، اختلاف رنگ کلی (TCD)، شاخص اشباعیت (SI)، زاویه هیو (HU)

**جدول ۵. نرخ تغییرات پارامترهای رنگ در پاسخ به زمان فرایند با استفاده از واکنش‌های سینتیک درجه صفر و درجه اول**

| دما (°C) | L K (min$^{-1}$) | a K (min$^{-1}$) | b K (min$^{-1}$) | a/b K (min$^{-1}$) | TCD K (min$^{-1}$) | SI K (min$^{-1}$) | HU K (min$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۶۰ | ۰/۰۰۰۴۵ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۰۰۴۴ | ۰/۰۰۰۵۹ | ۰/۰۶۸ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۰۰۵۴ |
| ۷۰ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۰۰۹۷ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۳ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۰۱ |
| ۸۰ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۰۵ | ۰/۰۰۳ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۰۵ | ۰/۰۰۲ |

شاخص اصلی رنگ شامل (L، a و b)، اختلاف رنگ کلی (TCD)، شاخص اشباعیت (SI)، زاویه هیو (HU)

میزان انرژی اکتیواسیون و هم‌چنین $k_0$ را داریم. این امر نشان‌دهنده‌ی این موضوع می‌باشد که پارامترهای مورد نظر در دماهای بالاتر نسبت به تخریب و از بین رفتن حساسیت بیشتری دارند. بیشترین افزایش در انرژی اکتیواسیون مربوط به TCD می‌باشد که در رنج دمایی بالاتر (۸۰ – ۷۰ درجه سانتی‌گراد) با افزایش بیش از ۴۲ واحدی در $E_a$ همراه بوده است که بر این اساس می‌توان گفت این فاکتور بیشترین حساسیت را به افزایش دما دارد. بدین مفهوم که با افزایش دمای فرایند میزان حساسیت این شاخص بیشتر شده و نسبت به شاخص‌های دیگر به افزایش دما سریع‌تر عکس العمل نشان می‌دهد. شاخص HU نیز با کمترین افزایش در $E_a$ در رنج دمایی بالاتر (حدود ۳/۶۲ واحد)، کمترین حساسیت را به افزایش دما دارد، که مطابق با نتایج حاصل از جدول ۳ می‌باشد.

در جدول ۵ با استفاده از معادله‌های شماره ۴ و ۵ که به‌ترتیب مربوط به واکنش‌های سینتیکی درجه صفر و درجه اول می‌باشند، نرخ تغییرات پارامترهای رنگ و یا به‌عبارت دیگر سرعت تخریب آنها در طی زمان آورده شده است. همان‌گونه که قبلاً نیز ذکر شد تمام پارامترها به استثناء TCD از شیب



[ Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2024-04-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.22518517.1394.5.17.4.7 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jcpp.5.17.43 ]

جدول ۶. ضرایب ثابت، ضرایب همبستگی و انحراف معیار میانگین پارامترهای رنگ مختلف

| ضرایب | L | a | b | a/b | TCD | SI | HU |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\beta_0$ | -۹/ ۵۸ | ۰/ ۲۲ | ۰/ ۵۲ | ۱/۹ ۲۷ | ۳۴/ ۵ | -۰/ ۳۵ | ۳۰/ ۴ |
| $\beta_1$ | ۰/ ۱۲ | ۰/ ۰۱ | ۰/۰۰۶۳ | ۰/۰۰۷۶ | -۰/ ۱۴ | ۰/ ۰۱ | -۰/ ۱۴ |
| $\beta_2$ | ۱/ ۰۸ | ۰/ ۰۳ | ۰/ ۰۳ | ۰/ ۰۲ | -۰/ ۹۷ | ۰/ ۰۴ | -۰/ ۱۴ |
| $\beta_{11}$ | ۰/۰۰۰۱ | ۰/۰۰۰۰۱ | ۰/۰۰۰۰۱ | ۰/۰۰۰۰۱ | ۰/۰۰۰۰۱ | ۰/۰۰۰۰۱ | ۰/۰۰۰۱ |
| $\beta_{22}$ | ۰/۰۰۷۶ | -۰/۰۰۰۲ | -۰/۰۰۰۲ | -۰/۰۰۰۲ | ۰/۰۰۶۷ | -۰/۰۰۰۳ | ۰/۰۰۱۱ |
| $\beta_{12}$ | -۰/۰۰۲۶ | ۰/۰۰۰۲ | -۰/۰۰۰۱ | -۰/۰۰۰۲ | ۰/۰۰۲۸ | -۰/۰۰۰۳ | ۰/۰۰۲۵ |
| $R^2$ | ۰/ ۹۹ | ۰/ ۹۸ | ۰/ ۹۵ | ۰/ ۹۹ | ۰/ ۹۷ | ۰/۹۹ | ۰/ ۹۸ |
| E (%) | ۰/۰۱ | ۰/۰۲ | ۰/۰۵ | ۰ | ۳/۰۵ | ۰/۰۳ | ۰/۰۱ |

شاخص اصلی رنگ شامل (L، a و b)، اختلاف رنگ کلی (TCD)، شاخص اشباعیت (SI)، زاویه هیو (HU)

واکنش‌های درجه اول پیروی می‌کنند. در واقع این مقادیر، خط مستقیم حاصل از رسم تغییرات این پارامترها در مقابل زمان فرایند در یک دمای مشخص می‌باشند. هم‌چنین این نرخ تغییرات با داشتن اطلاعات موجود در جدول ۲ و با استفاده از معادله شماره ۶ قابل تعیین می‌باشند. در هر سه دمای مورد بررسی بیشترین نرخ تغییرات مربوط به پارامتر TCD می‌باشد که بر این اساس نسبت به پارامترهای دیگر بیشترین تغییرات در طی زمان فرایند دارد. کمترین میزان نرخ تغییرات نیز مربوط به پارامتر b می‌باشد، بدین معنا که پارامتر b با وجود این‌که براساس معادله شماره ۶ و جدول ۲ بیشترین حساسیت را نسبت به تغییرات دما دارد (بالاترین میزان $E_a$) اما نرخ تغییرات آن نسبت به پارامترهای دیگر کمترین میزان می‌باشد. نکته دیگری که با توجه به جدول ۴ به وضوح مشخص می‌شود این است که با افزایش دمای واکنش، ثابت سینتیکی و یا نرخ تغییرات واکنش‌ها نیز افزایش یافته است. به‌عنوان مثال برای فاکتور a که شاخص رنگ قرمز محصول است با افزایش دما از ۶۰ به ۸۰ درجه سلسیوس شاهد افزایش ثابت واکنش از ۰/۰۰۱ به ۰/۰۰۵ هستیم. به‌عبارت دیگر با افزایش دما نرخ تغییرات تسریع شده و افت رنگ سریع‌تر رخ می‌دهد. این موضوع را می‌توان تأییدی بر افزایش سرعت واکنش‌های تجزیه‌ای کاروتنوئیدها و دیگر رنگدانه‌ها و یا افزایش مطلوبیت انجام قهوه‌ای شدن غیر آنزیمی با افزایش دما دانست (۱۵).

## مدل‌سازی به روش سطح پاسخ

همان‌گونه که قبلاً نیز ذکر شده در مدل‌سازی به روش RSM معمولاً از رابطه درجه دوم استفاده می‌شود. با توجه به معادله شماره ۷، مدل درجه دومی که برای مسئله مطرح شده در این پژوهش می‌توان ارائه داد دارای شکل کلی زیر خواهد بود (معادله ۹)، که Y شاخص مورد نظر جهت اندازه‌گیری خواهد بود (L، a، b، a/b، TCD، SI و HU)، $X_1$ متغیر مستقل زمان و $X_2$ متغیر مستقل دما می‌باشد هم‌چنین $\beta_0$ ضریب ثابت، $\beta_1$ و $\beta_2$ ضرایب اثرات خطی $\beta_{11}$ و $\beta_{22}$ضرایب اثرات مربعی و $\beta_{12}$ ضریب اثرات متقابل می‌باشند:

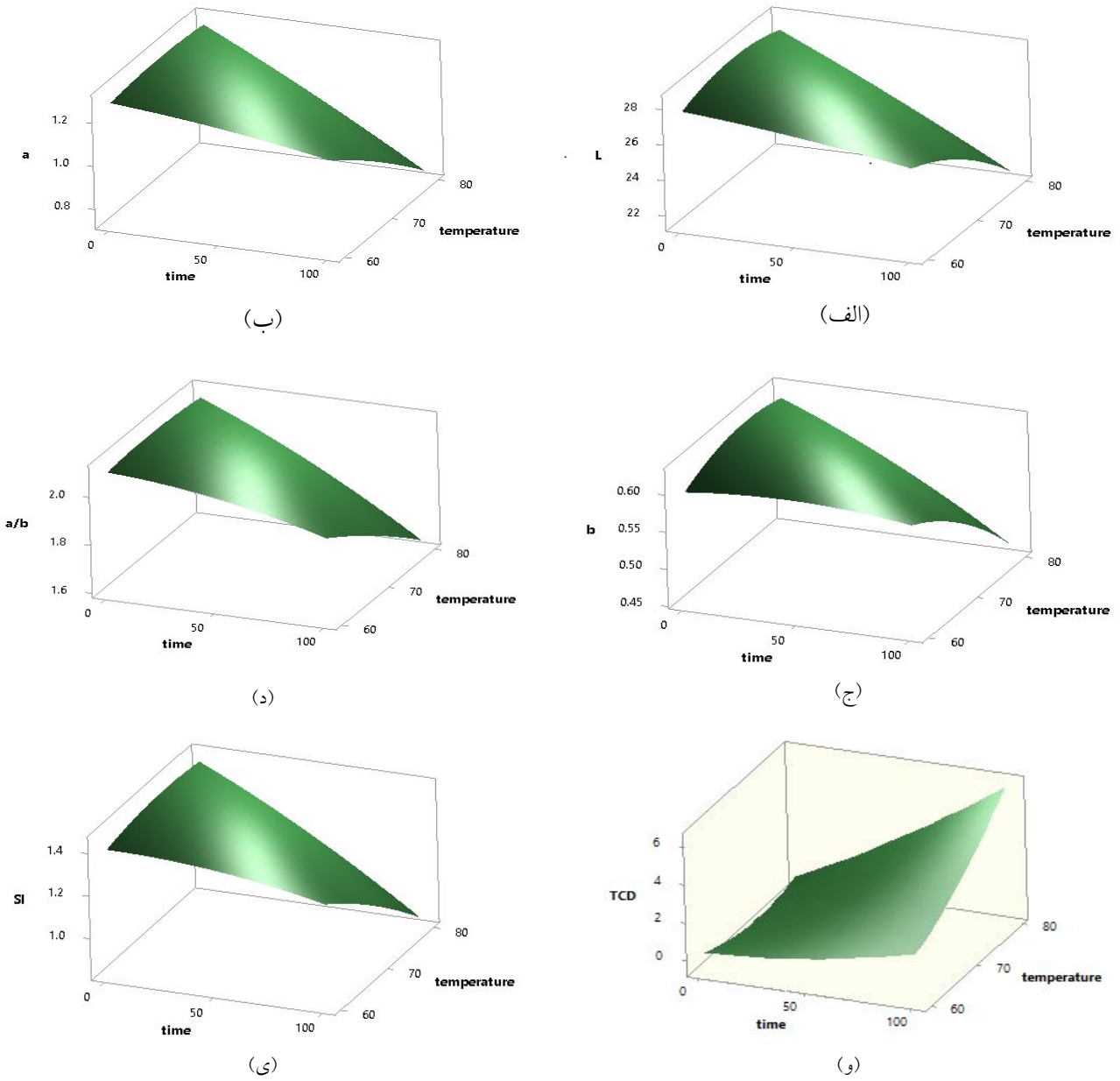
$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_{12} + \beta_{22} x_{22} + \beta_{12} x_1 x_2 \qquad (۹)$$

ضرایب ثابت این مدل برای هریک از پارامترهای مورد نظر و هم‌چنین ضریب همبستگی ($R^2$) این مدل‌ها با مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و مقادیر انحراف معیار میانگین (E) آنها در جدول ۶ ارائه شده است. ضرایب همبستگی بسیار بالا و مقادیر انحراف معیار پایین مشاهده شده در مدل‌های تمام پارامترها نشان‌دهنده‌ی نزدیکی قابل قبول مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌ها و مقادیر آزمایشگاهی می‌باشد.

در شکل ۲ نمودارهای سطح پاسخ برای پارامترهای رنگ



[ Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2024-04-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.22518517.1394.5.17.4.7 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jcpp.5.17.43 ]




**شکل ۲. نمودارهای سطح پاسخ تأثیر متغیرهای دما و زمان بر روی پارامترهای رنگ L (الف)، a (ب)، b (ج)، a/b (د)، TCD (ه)، SI (و) و HU (ز) رب گوجه‌فرنگی.**
**شاخص اصلی رنگ شامل (L، a و b)، اختلاف رنگ کلی (TCD)، شاخص اشباعیت (SI)، زاویه هیو (HU)**

مورد نظر نشان داده شده است. اثر مستقیم و متقابل هریک از متغیرهای مستقل روی پاسخ‌های مورد نظر به راحتی قابل ارزیابی می‌باشد. در شکل ۲- الف شاخص روشنایی یا L مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طورکه در این شکل مشخص است با افزایش دما و زمان، شاهد کاهش این شاخص هستیم که تأثیر دما نسبت به زمان به مراتب بیشتر می‌باشد و با افزایش دما از ۶۰ به ۸۰ درجه سلسیوس، شاهد کاهش بیشتر این شاخص نسبت به این کاهش در اثر افزایش زمان فرایند از ۲۵ به ۱۰۰ دقیقه هستیم. در این شاخص با وجود اینکه ضرایب دما و زمان مثبت و فقط اثر متقابل دما و



[ Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2024-04-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.22518517.1394.5.17.4.7 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jcpp.5.17.43 ]

زمان منفی است، اما به‌علت منفی و نسبت به دیگر ضرایب بزرگ بودن ضریب ثابت ($\beta_0$ = -۹/ ۵۸) شاهد کاهش میزان روشنایی نمونه با افزایش دما و زمان می‌باشیم. در دو شاخص a و b و هم‌چنین a/b نیز که به‌ترتیب در اشکال ۲- ب، ۲- ج و ۲- د نشان داده شده‌اند شاهد رفتار مشابه با پارامتر L می‌باشیم، تنها نکته قابل ذکر این می‌باشد که پارامتر b نسبت به دو پارامتر دیگر کمتر تحت تأثیر زمان فرایند قرار گرفته است که این موضوع در واقع تأییدی بر کمتر بودن نرخ تغییرات این پارامتر نسبت به بقیه می‌باشد که در بخش قبل به آن اشاره شد. در شکل ۲- ه شاهد افزایش TCD با افزایش دما و زمان می‌باشیم که به‌طور مشابه با شاخص‌های قبلی اثر دمای فرایند بیشتر بوده است. به‌عنوان مثال در دمای ثابت ۶۰ درجه با افزایش زمان فرایند از ۲۵ دقیقه به ۱۰۰ دقیقه شاهد افزایش این شاخص به میزان ۱/۷۲ واحد می‌باشیم ولی در زمان ثابت ۷۵ دقیقه با افزاش دمای فرایند از ۶۰ به ۸۰ درجه افزایش ۳/۴۱ واحدی TCD را خواهیم داشت. زاویه هیو نیز رفتار مشابه با TCD را نشان می‌دهد و با افزایش دما و زمان به میزان آن افزوده می‌شود (شکل ۲- ز). شاخص اشباعیت یا کروما نیز بیشتر تحت تأثیر دمای فرایند می‌باشد و در طی فرایند با کاهش مواجه شده است (شکل ۲- و). به‌طورکلی می‌توان گفت که شاخص‌های مورد بررسی چه به‌طور مستقل و چه به‌صورت متقابل (تعاملی) تحت تأثیر دو فاکتور مستقل مورد بررسی قرار می‌گیرند و تأثیر دما بیشتر از زمان می‌باشد.

## نتیجه‌گیری

طبق نتایج به‌دست آمده در این پژوهش همهٔ پارامترهای رنگ رب گوجه‌فرنگی بررسی شده (L، a، b، a/b، SI و HU) از سینتیک درجه اول پیروی می‌کنند به‌جز TCD که درجه صفر می‌باشد. با توجه به مقادیر ثابت آرنیوس مشخص شده در این پژوهش (جدول ۲) می‌توان به‌راحتی میزان تغییرات رنگ رب گوجه‌فرنگی را در طی فرایند حرارتی پیش‌بینی کرد. با استفاده از روش سطح پاسخ علاوه بر ارزیابی اثرات مستقیم و ترکیبی فاکتورهای مستقل (دما و زمان فرایند) بر روی پارامترهای هدف که با روش‌های معمول قابل ارزیابی نیست، مدل‌سازی روند تغییرات این پارامترها نیز انجام شد که ضرایب همبستگی بالا و انحراف معیارهای پایین آنها نشان دهندهٔ نزدیکی و همبستگی بالای نتایج پیش‌بینی شده با این مدل‌ها و مقادیر واقعی می‌باشد. این سیستم مدل شده قادر خواهد بود در شرایط دمایی و زمانی مشخص تقریب مناسب و قابل اعتمادی از فاکتورهای رنگ مورد نظر در اختیار قرار دهد و یا از طرف دیگر به اپراتورها این امکان را دهد که برای رسیدن به شرایط دمایی مشخص دما و زمان‌های مناسبی را برای فرایند محصول انتخاب نمایند.

## منابع مورد استفاده


1. Ahmed, J. and H. S. Ramswamy. 2005. Effect of temperature on dynamic on rheology and color degradation on kinetics of date paste. *Food and Bioproducts Processing* 83: 198–202.
2. Ahmed, J., U. S. Shivhare and G. S. V. Raghavan. 2000. Rheological characteristics and kinetics of color degradation of green chilli puree. *Journal of Food Engineering* 44: 239-244.
3. Ahmed, J., U. S. Shivhare and G. S. V. Raghavan. 2004. Thermal degradation kinetics of anthocyanin and visual color of plum puree. *European Food Research and Technology* 218: 525–528.
4. Ahmed, J., U. S. Shivhare and K. Mandeep. 2002. Thermal color degradation kinetics of mango puree. *International Journal of Food Properties* 5:359–366.
5. Ahmed, J., U. S. Shivhare and K. S. Sandhu. 2002. Thermal degradation kinetics of carotenoids and visual color of papaya puree. *Journal of Food Science* 67(7): 2692–2695.
6. Anonymous. 1976. Color and Color Related Properties, Instruction Manual. Gardner Laboratories, Maryland, USA.




[ Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2024-04-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.22518517.1394.5.17.4.7 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jcpp.5.17.43 ]

7. Antonio, G. C., D. G. Alves, P. M. Azoubel, F. E. X. Murr and K. J. Park. 2008. Influence of osmotic dehydration and high temperature short time processes on dried sweet potato (*Ipomoea batatas* Lam.). *Journal of Food Engineering* 84 (3): 375–382.
8. Atkinson, A. C. and A. N. Donev. 1992. Optimum Experimental Design. Oxford University Press. USA.
9. Avila, I. and C. L. M. Silva. 1999. Modeling kinetics of thermal degradation of color in peach puree. *Journal of Food Engineering* 39: 161-166.
10. Baik O. D. and G. S. Mittal. 2003. Kinetics of tofu color changes during deep-fat frying. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie* 36: 43–48.
11. Barreiro, J. A., M. Milano and A. J. Sandoval. 1997. Kinetics of color change of double concentrated tomato paste during thermal treatment. *Journal of Food Engineering* 33: 359–371.
12. Boakye, k. and G. S. mittal. 1996. Changes in color of beef *M. longissimus* dorsi muscle during aging. *Meat Science* 42: 347-354.
13. Boskovic, M. 1979. Fate of lycopene in dehydrated tomato products: carotenoid isomerization in food systems. *Journal of Food Science* 44: 84-86.
14. Choi, K., G. Lee, Y. J. Han and J. M. Bunn. 1995. Tomato maturity evaluation using color image analysis. *Transactions of the ASAE* 38: 171-176.
15. Chutintrasri, b. and A. Noomhorm. 2007. Color degradation kinetics of pineapple puree during thermal processing. *LWT- Food Science and Technology* 40: 300–306.
16. Fernando Reyes, L. and L. Cisneros-Zevallos. 2007. Degradation kinetics and colour of anthocyanins in aqueous extracts of purple and red-flesh potatoes (*Solanum tuberosum* L.). *Food Chemistry 100: 885-894.*
17. Garza, S., A. Ibarz, J. Pagan and J. Giner. 1999. Non-enzymatic browning in peach puree during heating. *Food Research International* 32: 335–343.
18. Giese, J. 2000. Color measurement in foods as a quality parameter. *Food Technology* 54(2): 62–65.
19. Gold, A. A. 1983. Tomato Production, Processing and Quality Evaluation, 2nd Edition, Connecticut: AVI Publishing, West Port.
20. Guillou, A. A. and J. D. Floros. 1993. Multiresponse optimization minimizes salt in natural cucumber fermentation and storage. *Journal of Food Science* 56: 1381-1389.
21. Hackett, M. M., J. H. Lee, D. Francis and S. J. Schwartz. 2004. Thermal stability and isomerization of lycopene in tomato oleoresins from different varieties. *Journal of Food Science* 69(7): 536–541
22. Hayakawa, K. I. and G. E. Timbers. 1977. Impudence of heat treatment on the quality of vegetables: changes in visual green color. *Journal of Food Science* 42: 778-781.
23. Hayes, W. A., P. G. Smith and A. E. J. Morris, 1998. The production and quality of tomato concentrates. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 38(7): 537-564.
24. Ibarz, A., J. Pagan and S. Garza. 1999. Kinetic models for color changes in pear puree during heating at relatively high temperatures. *Journal of Food Engineering* 39: 415–422.
25. Lau, M. H., J. Tang and B. T. Swanson. 2000. Kinetics of textural and color changes in green asparagus during thermal treatments. *Journal of Food Engineering* 45: 231–236.
26. Lovric, T., Z. Sahlek and M. Boskovic .1980. Cis-trans isomerization of lycopene and color stability of foammat dried omato paste powder during storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 212- 641.
27. Lozano, J. E. and A. Ibarz. 1997. Color changes in concentrated fruit pulp during heating at high temperatures. *Journal of Food Engineering* 31: 365-373.
28. Maskan, M. 2001. Kinetics of color change of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering* 48: 169-175.
29. Maskan, M. 2003. Change in color and rheological behavior of sunflower seed oil during frying and after adsorbent treatment of used oil. *European Food Research and Technology* 218: 20-25.
30. Mohammadi, A, Sh. Rafiee, Z. Emam-Djomeh and A. R. Keyhani. 2008. Kinetic models for color changes in kiwifruit slices during hot air drying. *World Journal of Agricultural Sciences* 4 (3): 376-383.
31. Myers R. H. and D. C. Montgomery. 2002. Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments. Wiley Publications, New York.
32. Pedreschi, F., P. Moyano, K. Kaack and K. ranby. 2005. Color changes and acryl amide formation in fried potato slices. *Food Research International* 38: 1–9.
33. Rattanathanalerk, M., N. Chiewchan and W. Srichumpoung. 2005. Effect of thermal processing on the quality loss of pineapple juice. *Journal of Food Engineering* 66:259–265.
34. Reynolds, T. H. 1965. Chemistry of non-enzymatic browning II. *Advance Food Research* 14: 167-210.
35. Rhim, J. W., R. V. Nunes, V. A. Jones and K. R. Swartzel. 1989. Kinetics of color change of grape juice generated using linearly increasing temperature. *Journal of Food Science* 54: 776.



[ Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2024-04-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.22518517.1394.5.17.4.7 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jcpp.5.17.43 ]

36. Rodrigo D., A. V. Loey and M. Hendrickx. 2007. Combined thermal and high pressure color degradation of tomato puree and strawberry juice. *Journal of Food Engineering* 79: 553–560.
37. Sanchez, A. H., L. Rejano and A. Montario. 1991. Kinetics of the destruction by heat of color and texture of pickled green olives. *Journal of Food Science* 54: 379.
38. Schwartz, S. J. and T. V. Lorenzo. 1990. Chlorophyll in foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 29: 1-5.
39. Schwartz, S. J. and T. V. Lorenzo. 1991. Chlorophyll stability during continuous aseptic processing and storage. *Journal of Food Science* 56: 10-59.
40. Suh, H. J., D. O. Noh, C. S. Kang, J. M. Kim and S. W. Lee. 2003. Thermal kinetics of color degradation of mulberry fruit extract. *Nahrung/Food* 47: 132 – 135.
41. Tiwari, B. K., K. Muthukumarappan, C. P. O. Donnell and P. J. Cullen. 2008. Modeling color degradation of orange juice by ozone treatment using response surface methodology. *Journal of Food Engineering* 88: 553–560.

[ Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2024-04-20 ]

[ DOR: 20.1001.1.22518517.1394.5.17.4.7 ]

[ DOI: 10.18869/acadpub.jcpp.5.17.43 ]