



مجله علوم و صنایع غذایی ایران

سایت مجله: www.fsct.modares.ac.ir

مقاله علمی-پژوهشی

بهینه‌سازی شرایط استخراج ترکیبات فنولی و آنتی‌اکسیدانی از چغندر قرمز توسط اولتراسونیک

مهشاد لوارستاق^۱، نفیسه زمین دار^{۲*}، مریم کشانی^۳

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و صنایع غذایی؛ دانشکده کشاورزی، آب، غذا و فراسودمندها؛ واحد اصفهان (خوراسگان)؛ دانشگاه آزاد اسلامی؛ اصفهان؛ ایران.

۲- دانشیار، گروه علوم و صنایع غذایی؛ دانشکده کشاورزی، آب، غذا و فراسودمندها؛ واحد اصفهان (خوراسگان)؛ دانشگاه آزاد اسلامی؛ اصفهان؛ ایران.

۳- دانشجوی دکتری، گروه علوم و صنایع غذایی، واحد شهرضا، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرضا، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

ریشه چغندر قرمز (*Beta vulgaris rubra*) یک ماده خام مهم گیاهی است که اثر مثبت اثبات شده در بدن انسان دارد. ریشه چغندر حاوی مقدار زیادی آنتی اکسیدان، ویتامین-ها، فیبر و رنگ های طبیعی است. ریشه چغندر قرمز همچنین غنی از ترکیبات فنولی است که خواص آنتی اکسیدانی دارند. در این تحقیق اثر متغیرهای pH (۳-۵)، دما (۱۵-۲۵ درجه سانتی گراد) و زمان استخراج (۱۰-۲۰ دقیقه) بر میزان مواد جامد محلول، ترکیبات فنولی و فعالیت آنتی اکسیدانی عصاره حاصل از چغندر قرمز بررسی شد. استخراج از چغندر قرمز با استفاده از مخلوط آب: اتانول با نسبت ۱:۱ انجام شد. از امواج اولتراسوند با شدت ۷۵ درصد و فرکانس ۳۷kHz برای تسهیل فرآیند استخراج استفاده گردید. داده ها با استفاده از نرم افزار دیواین اکسپرت و روش بهینه سازی سطح پاسخ آنالیز شدند. نتایج نشان داد که با افزایش pH و زمان استخراج مقادیر مواد جامد محلول کل، فنول ها و فعالیت آنتی اکسیدانی نیز افزایش می یابد. همچنین افزایش دما تا ۲۰ درجه سانتی گراد مقادیر این پاسخ ها را افزایش داد اما دماهای بالاتر از ۲۰ درجه سانتی-گراد باعث کاهش در این مقادیر شد. نتایج تجربی به دست آمده در نقطه بهینه پیشنهادی توسط نرم افزار با نتایج پیش بینی شده توسط مدل تفاوت معنی داری نداشت ($p < 0/05$).

تاریخ های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۷

کلمات کلیدی:

چغندر قرمز،

اولتراسوند،

ترکیبات فنولی،

فعالیت آنتی اکسیدانی،

بهینه سازی سطح پاسخ.

DOI: 10.48311/fsct.2026.83395.0

* مسئول مکاتبات:

n.zamindar@iau.ac.ir.

۱-مقدمه

چغندر قرمز (*Beta vulgaris* L.) گیاهی از تیره اسفناج (*Chenopodiaceae*) است. چغندر های این گروه عمدتاً در کناره های دریای آتلانتیک و مدیترانه وجود دارند [1]. چغندر قند حاوی رنگدانه‌های بتالاین^۱ وابسته به آنتی-اکسیدان‌های کاتیونی است. بتالاین‌ها ترکیبات نیتروژنی محلول در آب هستند که در عصاره سلولی یافت می‌شوند. رنگدانه‌های بتالاین به دو گروه بتاسیانین‌های^۲ قرمز و بتاگزانتین‌های^۳ زرد تقسیم بندی می‌شوند. بتالاین‌ها دارای خاصیت آنتی‌اکسیدانی و قابلیت خنثی کردن رادیکال‌های آزاد هستند. ویژگی آنتی‌اکسیدانی بتاسیانین‌ها به گروه‌های فنولی آزاد آن‌ها نسبت داده می‌شود. گروه آمین حلقه بتالامیک اسید به عنوان اهدا کننده هیدروژن در بتاسیانین و بتاگزانتین عمل می‌کند [2]. چغندر قرمز یکی از ده گیاه دارای بیش‌ترین پتانسیل آنتی‌اکسیدانی است که به ویژگی‌های ساختاری بتالاین و حضور ترکیبات فنولی نسبت داده می‌شود [3]. ترکیبات فنولی شامل فنولیک اسیدها (هیدروکسی بنزویک و هیدروکسی سینامیک اسیدها)، پلی فنول‌ها و فلاونوئیدها می‌باشند [4]. ترکیبات فنولی و دیگر آنتی-اکسیدان‌های موجود در میوه‌ها و سبزیجات قادر به خنثی کردن رادیکال‌های آزاد هستند و می‌توانند نقش مهمی در جلوگیری از بیماری‌های خاص داشته باشند [5].

فرآیند استخراج ترکیبات فنولی و آنتی‌اکسیدانی با توجه به ماهیت شیمیایی ترکیبات، روش استخراج بکار برده شده، زمان و شرایط نگهداری و حضور مواد مزاحم تحت تاثیر قرار می‌گیرد. عوامل زیادی روی فرآیند استخراج با حلال اثر می‌گذارند: نوع حلال، pH، دما، تعداد مراحل استخراج، نسبت حلال به جامد و اندازه ذرات ماتریکس جامد [6]. ترکیبات آنتی‌اکسیدانی معمولاً از منابع گیاهی به وسیله استخراج جامد-مایع با استفاده از حلال‌های آلی و روش‌های

متداول، بدست می‌آیند. با این حال، روش‌هایی که زمان استخراج، انرژی و حجم حلال را کاهش می‌دهند، مانند گرمایش همیک، اولتراسونیک، مایکروویو و استخراج با فشار بالا، به دلیل سازگاری بیشتر با اصل استخراج سبز، توجه بیشتری را به خود جلب کرده‌اند [7-9]. اولتراسوند به دلیل پدیده کاویتاسیون باعث شکست دیواره سلولی ماتریکس جامد، نفوذ حلال، انتقال جرم و در نتیجه افزایش سرعت استخراج می‌شود. [3, 10, 11]

داسیلوا^۴ و همکاران (۲۰۱۸) عصاره استخراج شده از چغندر قرمز، با استفاده از امواج اولتراسوند را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها تاثیر متغیرهای فرآیند (دما، زمان و نسبت حلال به آب) را روی عصاره استحصال به وسیله طرح آزمایشی باکس-بنکن که شرایط بهینه استخراج عصاره را تعیین می‌کند، ارزیابی کردند. شرایط بهینه استخراج بتاسیانین و بتاگزانتین دمای ۵۲ و ۳۷ درجه سانتی‌گراد، زمان ۹۰ دقیقه با استفاده از محلول ۲۵ درصد اتانول در آب به دست آمد. عصاره به دست آمده از روش اولتراسونیک محتوای فنولی بیش‌تر و فعالیت آنتی‌اکسیدانی بزرگتری نسبت به عصاره حاصل از روش‌های متداول داشت [3]. کوشواها^۵ و همکاران (۲۰۱۸) بتالاین‌ها، ترکیبات فنولی و آنتی‌اکسیدانی ریشه چغندر را به وسیله متغیرهای تجربی مختلف مانند نسبت جامد به مایع، دما، زمان و pH با استفاده از روش بهینه سازی سطح پاسخ، استخراج کردند. نتایج نشان داد که نسبت جامد به مایع (۱:۱۵)، دمای (۵۰/۰۴°C)، زمان (۱۰ دقیقه) و pH (۲.۵۰) شرایط بهینه برای استخراج بتالاین و دیگر فیتوکمیکال‌ها بود [12].

با توجه به ارزان بودن کشت چغندر قرمز در ایران و اینکه عصاره چغندر قرمز غنی از ترکیبات فنولی و سایر ترکیبات آنتی‌اکسیدانی است، هدف از این پژوهش بررسی اثر پارامترهای فرآیند از جمله دما، زمان و pH بر مقدار مواد

4. Da Silva

5. Kushwaha

1. Betalain

2. Betacyanins

3. Betaxanthins

۲-۳-۲- اندازه گیری ترکیبات فنولی عصاره

به منظور اندازه گیری ترکیبات فنولی از روش فولین سیوکالتو استفاده شد. برای این منظور ۱ میلی لیتر از عصاره به دست آمده برداشته شد و به ترتیب ۰.۵، ۱ و ۷.۵ میلی لیتر از محلول های فولین سیوکالتو، کربنات سدیم ۲۰ درصد و آب مقطر به آن افزوده و با ورتکس چند ثانیه هم زده شد. پس از ۳۰ دقیقه انکوباسیون و در دمای محیط جذب نمونه ها در طول موج ۷۶۰ نانومتر قرائت شد و نتایج بر اساس میلی گرم گالیک اسید در میلی لیتر عصاره بیان شد [15]. جهت تعیین محتوای ترکیبات فنولیک موجود در عصاره گیاه چغندر قرمز ابتدا باید نمودار استاندارد آن را بر حسب گالیک اسید مشخص گردد (شکل ۱).

شکل (۱) نمودار استاندارد ترکیبات فنولیک بر حسب گالیک اسید
(میلی گرم بر میلی لیتر)

Fig(1) Standard graph for phenolic compounds according to gallic acid equivalent (mg/ml)

۲-۳-۳- اندازه گیری میزان مهار رادیکال آزاد

فعالیت آنتی اکسیدانی عصاره با استفاده از مهار رادیکال آزاد اندازه گیری شد. در این روش ۰.۱ میلی لیتر از عصاره به ۳.۹ میلی لیتر از DPPH (با غلظت ۰/۰۶ میلی مولار) افزوده و به مدت ۳۰ ثانیه با ورتکس همزده شد. مخلوط حاصل به مدت ۳۰ دقیقه به منظور انجام واکنش در محل تاریک قرار گرفت سپس جذب در طول موج ۵۱۵ نانومتر قرائت گردید. لازم به ذکر است که نمونه کنترل همان محلول متانولی DPPH بدون افزودن عصاره بود. در نهایت، درصد مهار رادیکال ها بر اساس فرمول محاسبه و بر اساس درصد گزارش شد [16].

معادله (۱)

$$Aa - \left\{ \frac{100}{Aa} * (Ab - Ac) \right\} = \text{درصد فعالیت آنتی اکسیدانی}$$

Aa = جذب محلول DPPH بدون نمونه

Ab = جذب محلول حاوی DPPH و نمونه

Ac = جذب محلول شاهد بدون نمونه

جامد محلول، محتوای فنولی و ظرفیت آنتی اکسیدانی عصاره استخراج شده از چغندر قرمز است. در این تحقیق به منظور تسهیل فرآیند استخراج، از امواج اولتراسوند با شدت ۷۵ درصد و فرکانس ۳۷kHz استفاده گردید.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- مواد

مواد مورد استفاده در این تحقیق شامل چغندر قرمز خریداری شده از بازار محلی در اصفهان، فنول (Merck, Germany)، فولین سیوکالتو (Merck, Germany)، کربنات سدیم (Merck, Germany)، گالیک اسید (Sigma, India)، اودی فیل ۱-۲ پیکریل هیدرازیل (DPPH) (Sigma, India) بود.

۲-۲- آماده سازی چغندر قرمز

به منظور آماده سازی چغندر قرمز، شستشوی چغندره های قرمز با استفاده از آب برای جداسازی آلودگی ها انجام شد. چغندره های قرمز پس از پوست گیری و رنده شدن به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۳۰ درجه سانتی گراد خشک و سپس توسط آسیاب پودر و آماده عصاره گیری شدند. جهت عصاره گیری ۱۰ گرم پودر چغندر قرمز به همراه ۲۰۰ میلی لیتر از حلال آب:اتانول با نسبت ۱:۱ مخلوط و به مدت ۱۰، ۱۵ و ۲۰ دقیقه در سه دمای ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درجه سانتی گراد و سه pH برابر ۳، ۴ و ۵ در معرض اولتراسوند پروب دار با قطر ۷ میلی متر با شدت ۷۵٪ و فرکانس ۳۷ کیلوهرتز قرار داده شد. سپس تفاله با استفاده از کاغذ صافی واتمن شماره ۱ جدا و در آون با دمای ۳۵ درجه سانتی گراد خشک شد و برای آزمون های بعدی مورد استفاده قرار گرفت [13].

۲-۳- روش ها

۲-۳-۱- اندازه گیری میزان ماده جامد محلول

قبل از اینکه عصاره های چغندر خشک شوند میزان ماده جامد محلول آنها با استفاده از دستگاه رفراکتومتر اندازه گیری و بر حسب درجه بریکس گزارش شد [14].

۲-۴- جامعه آماری و روش تجزیه و تحلیل اطلاعات

به منظور تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، همان‌طور که در مطالعه‌ی لوارستاق و همکاران (۲۰۲۴) نیز ذکر شده است از نرم افزار دیزاین اکسپرت نسخه ۷ و روش بهینه سازی سطح پاسخ استفاده شد. طرح هیستوریکال دیتا در ۲۹ اجرای استاندارد برای تحلیل داده‌ها مورد استفاده قرار گرفت. سطوح متغیرهای مورد بررسی و تیمارهای مورد استفاده در آزمایش به ترتیب در جدول ۱ و ۲ نشان داده شده است. پس از بهینه سازی شرایط برای بیشترین سطح پاسخ‌ها در فرایند با توجه به نقطه بهینه بدست آمده برای استخراج، مجدداً استخراج انجام شد و فاکتورهای مورد بررسی برای فرمولاسیون بهینه (جدول ۳) تعیین شد. مقایسه بین پاسخ برای نقاط بهینه با پاسخ پیش بینی شده نرم افزار با آزمون تی استیودنت ($p < 0.05$) صورت گرفت. به منظور کاهش خطا کلیه آزمایش‌ها در ۳ تکرار انجام شد [17].

جدول ۱- مقادیر واقعی و کد شده متغیرهای مستقل فرآیند

Table (1) The real and coded values of independent variables of process

جدول ۲- طراحی تجربی متغیرهای مستقل استخراج عصاره از چغندر قرمز

Table (2) Experimental design of independent variables of red beet extraction

جدول ۳- سطوح پارامترهای فرآیند برای نقطه بهینه

Table (3) Process parameter levels for the optimal point

۳- نتایج و بحث

روش سطح پاسخ مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری است و در بهینه سازی فرآیندهایی بکار می‌رود که پاسخ مورد نظر توسط تعدادی از متغیرها تحت تاثیر قرار می‌گیرد. پس از آنالیز داده‌ها توسط برنامه Design expert جهت تعیین

بهترین مدل پیشنهادی از میان انواع موجود میانگین^۶، کوپیک^۷ (درجه سه)، کوادراتیک^۸ (درجه دو)، اثر متقابل دو مدل^۹ و خطی^{۱۰} با توجه به جدول تجزیه واریانس، مدلی که مقدار مجموع مربعات^{۱۱} آن دارای اختلاف معنی‌دار بود و مقدار عدم برازش^{۱۲} آن معنی‌دار نبود به عنوان بهترین مدل انتخاب شد. با توجه به این موضوع و پس از بررسی نتایج بدست آمده و مقایسه میان مدل‌های رگرسیونی نتایج حاکی از آن بود که مدل کوادراتیک برای تمامی آزمون‌های اندازه‌گیری شده در این مطالعه، مدل معنی‌داری است.

۳-۱- مواد جامد محلول کل (TSS)

مدل پیشنهاد براساس مقادیر واقعی آزمایشگاهی برای این پاسخ به صورت معادله چند جمله‌ای درجه دوم بود که در آن TSS نماد کل مواد جامد محلول، (A) نماد pH، (B) نماد دما و (C) زمان می‌باشد.

معادله (۲)

$$TSS = 12.60 - 0.30A + 0.66B - 1.81C + 0.04AB + 0.05AC + 3.26 \times 10^{-3}BC + 1.26 \times 10^{-3}A^2 - 0.02B^2 + 0.06C^2$$

$$(R^2 = 0.91)$$

جدول (۴) نتایج آنالیز واریانس را برای ارزیابی پارامتر پاسخ ماده جامد محلول کل چغندر قرمز در مورد مدل سه بعدی با آثار متقابل نشان می‌دهد. پارامترهای pH و زمان اثر معنی‌داری بر پاسخ مواد جامد محلول کل چغندر داشت اما دما اثر معنی‌داری بر این پاسخ نداشت. مقدار P-value مربوط به اثر متقابل جمله AC، BC و AB تاثیر معناداری بر مدل نداشت. همچنین عدم برازش مدل معنادار نبود ($p > 0.05$) به عبارت دیگر مدل داده‌های تجربی را برازش می‌کند. مقدار ضریب تشخیص یا تبیین (R^2) برابر با ۰/۹۰۵۰ نشان

5. Linear

6. Sum of squar

7. Lack of fit

1. Mean

2. Cubic

3. Quadratic

4. 2FI

داد که این عدد تقریباً به یک نزدیک بوده و بیانگر تطبیق زیاد نتایج مدل با نتایج تجربی است. (R^2) متعادل شده در این مدل ۰.۸۶ بود که نشان داد تنها ۱۴ درصد از متغیرهای کل به وسیله مدل توجیه نشده‌اند. R^2 پیش‌بینی شده در این مدل نیز برابر ۰.۷۲ بود که تناسب خوبی با R^2 متعادل شده نداشته است.

جدول (۴) آنالیز واریانس مواد جامد محلول

Table (4) Analysis of variance of total soluble solids

شکل (۲) (الف) اثر pH بر مواد جامد محلول را نشان می‌دهد در حالیکه سایر پارامترها به میزان حد واسط در نظر گرفته شده‌اند (دما ۲۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۱۵ دقیقه). همانطور که در نتایج جدول آنالیز واریانس نیز مشاهده گردید افزایش pH باعث افزایش معنی‌دار در مقدار مواد جامد محلول گردید. شکل ۲ (ب) مواد جامد محلول را بر حسب دما نشان می‌دهد و بقیه پارامترها به میزان حد واسط در نظر گرفته شده‌اند (pH برابر با ۴ و زمان ۱۵ دقیقه). افزایش دما تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد باعث افزایش در میزان مواد جامد محلول گردید اما از دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد به بعد میزان مواد جامد محلول کاهش یافت. میزان مواد جامد محلول به عنوان پاسخ بر حسب پارامتر زمان نیز در شکل ۲ (ج) نشان داده شده است (پارامتر pH و دما به میزان حد واسط در نظر گرفته شده‌اند). چنان که مشاهده می‌شود، افزایش زمان باعث افزایش معنی‌دار در میزان مواد جامد محلول کل شد.

شکل (۲) میزان مواد جامد محلول بر حسب پارامترهای (الف) pH،

(ب) دما و (ج) زمان

Fig (2) The amount of soluble solids in terms of parameters (A) pH, (B) Temperature (C) Time

شکل (۳) (الف) اثر متقابل دما و زمان بر مواد جامد محلول کل در pH ثابت ۳ را نشان می‌دهد. با افزایش دما تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد میزان مواد جامد محلول افزایش یافت اما با افزایش دما از ۲۰ درجه سانتی‌گراد به بعد میزان مواد جامد محلول کاهش یافت. با افزایش زمان استخراج میزان مواد جامد محلول کل نیز افزایش یافت. اثر متقابل دما و زمان در pH ثابت ۴ در شکل ۳ (ب) مشاهده می‌شود. بیش‌ترین میزان مواد جامد محلول در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۲۰ دقیقه بود. در شکل ۳ (ج) نیز اثر متقابل دما و زمان در pH ثابت ۵ مشاهده می‌گردد. افزایش دما تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد و افزایش زمان تا ۲۰ دقیقه باعث افزایش در میزان مواد جامد محلول کل گردیده است اما از دمای ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد افزایش دما موجب کاهش در میزان آن شد.

شکل (۳) اثر متقابل دما و زمان بر میزان مواد جامد محلول در (الف)

pH ثابت ۳، (ب) pH ثابت ۴ و (ج) pH ثابت ۵

Fig (3) Interaction of temperature and time on soluble solids at pH 3, 4 and 5

شکل (۴) (الف) اثر متقابل pH و زمان بر میزان مواد جامد محلول در دمای ثابت ۱۵ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. بر این اساس افزایش دما و زمان باعث افزایش در میزان مواد جامد محلول کل گردید. شکل ۴ (ب) اثر متقابل pH و زمان در دمای ثابت ۲۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. افزایش pH و زمان باعث افزایش محسوس در میزان مواد جامد محلول در دمای ثابت ۲۰ درجه سانتی‌گراد گردید. اثر متقابل pH و زمان بر میزان مواد جامد محلول در دمای ثابت ۲۵ درجه سانتی‌گراد در شکل ۴ (ج) نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود بیش‌ترین میزان مواد جامد محلول کل مربوط به pH برابر ۵ و زمان ۲۰ دقیقه بوده است.

شکل (۴) اثر متقابل pH و زمان بر میزان مواد جامد محلول در

(الف) دمای ثابت ۱۵°C، (ب) دمای ثابت ۲۰°C و (ج) دمای ثابت

۲۵°C

پارامتر pH و دما دارای مقدار F-value کمتر از ۰.۰۵ بوده‌اند و تاثیر معناداری بر مدل داشتند. عدم برازش در این مدل معنادار نبود ($p > 0.05$). به عبارت دیگر مدل داده‌های تجربی را برازش کرد. مقدار ضریب تشخیص یا تبیین (R^2) برابر با ۰.۹۹ بود و نشان داد که این عدد کاملاً به یک نزدیک بوده است. این موضوع بیانگر تطبیق زیاد نتایج مدل با نتایج تجربی است. R^2 متعادل شده در این مدل ۰.۹۸ بود که نشان داد تنها دو درصد از متغیرهای کل به وسیله مدل توجیه نشده‌اند. R^2 پیش بینی شده در این مدل برابر ۰/۹۷ بود که متناسب با R^2 متعادل شده بدست آمد.

مدل نهایی پیشنهادی بر پایه داده‌های واقعی آزمایشگاهی، به صورت یک معادله درجه دوم چند جمله‌ای ارائه شد که در آن فنول کل به عنوان پاسخ، pH (A)، دما (B) و (C) زمان به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شده‌اند.

معادله (۳)

$$\begin{aligned} phenol = & -300.46 + 82.07A + 32.93B + 4.92C \\ & + 0.18AB - 0.25AC - 0.04BC \\ & - 6.04A^2 - 0.78B^2 - 0.04C^2 \end{aligned}$$

$(R^2=0.99)$

جدول ۵- آنالیز واریانس کل ترکیبات فنولی

Table (5) Analysis of variance of total phenolic compound

میزان فنول کل بر حسب پارامتر pH در شکل ۶ (الف) نشان داده شده است. سایر پارامترها به میزان حد واسطه در نظر گرفته شده‌اند (دما ۲۰ درجه سانتی‌گراد و زمان برابر با ۱۵ دقیقه). چنان که مشاهده می‌گردد، پارامتر pH اثر معنی‌دار بر پاسخ فنول کل چغندر قرمز داشت. شکل ۶ (ب) اثر پارامتر دما را روی پاسخ فنول کل نشان می‌دهد (پارامتر pH برابر با ۴ و زمان ۱۵ دقیقه در نظر گرفته شده است) که افزایش دما تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد اثر معنادار بر میزان فنول کل داشته است اما افزایش دما از ۲۰ درجه سانتی‌گراد به

Fig (4) Interaction of pH and time on soluble solids at temperatures 15, 20 and 25°C

شکل (۵) (الف) نمایانگر اثر متقابل pH و دما بر میزان مواد جامد محلول در زمان ثابت ۱۰ دقیقه می‌باشد. افزایش pH از ۳ تا ۵ و افزایش دما از ۱۵ تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد باعث افزایش در میزان مواد جامد محلول کل گردید اما از دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد به بعد کاهش در میزان مواد جامد محلول کل مشاهده شد. در شکل ۵ (ب) اثر متقابل pH و دما بر مواد جامد محلول کل در زمان ثابت ۱۵ دقیقه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هر چه pH افزایش یافته است میزان مواد جامد محلول کل بیش‌تر شده است. در زمان ثابت ۱۵ دقیقه نمودار از دمای ۱۵ تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد حالت صعودی داشته اما از دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد به بعد حالت نزولی پیدا کرده است. اثر متقابل pH و دما بر مواد جامد محلول در زمان ثابت ۲۰ دقیقه در شکل ۵ (ج) نشان داده شده است. با افزایش pH تا ۵ و دما تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد مواد جامد محلول کل افزایش یافته ولی از دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد به بعد مقدار آن کاهش پیدا کرده است.

شکل (۵) اثر متقابل pH و دما بر میزان مواد جامد محلول در (الف) زمان ثابت ۱۰ دقیقه، (ب) زمان ثابت ۱۵ دقیقه و (ج) زمان ثابت ۲۰ دقیقه

Fig (5) Interaction of pH and temperature on soluble solids at 10, 15 and 20 min

۳-۲- ترکیبات فنولی کل

جدول (۵) نتایج آنالیز واریانس را برای ارزیابی پارامتر پاسخ فنول کل چغندر قرمز درمورد مدل درجه دو با آثار متقابل نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود پارامترهای pH و زمان و دما اثر معنی‌داری بر پاسخ فنول کل چغندر قرمز داشت. مقدار آثار متقابل pH و دما و زمان اثر معناداری بر مدل نداشت. جمله‌های درجه دوم A^2 و B^2 و C^2 (درجه دوم

شکل (۸) (الف) اثر متقابل pH و زمان بر میزان فنول کل در دمای ثابت ۱۵ درجه سانتی گراد را نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل مشاهده می‌شود با افزایش pH و مدت زمان میزان فنول کل افزایش یافته است. اثر متقابل pH و زمان بر میزان فنول کل در دمای ثابت ۲۰ درجه سانتی گراد (شکل ۸ ب) نیز نشان می‌دهد که افزایش این دو فاکتور باعث افزایش در مقدار فنول کل شده است. در شکل ۸ (ج) اثر متقابل pH و زمان بر میزان فنول کل در دمای ثابت ۲۵ درجه سانتی گراد نشان داده شده است. افزایش pH از ۳ به ۵ و افزایش زمان از ۱۰ به ۲۰ دقیقه نیز موجب افزایش در مقدار فنول کل گردیده است.

شکل (۸) (الف) اثر متقابل pH و زمان بر میزان فنول کل در (الف) دمای

ثابت ۱۵°C، (ب) دمای ثابت ۲۰°C و (ج) دمای ثابت ۲۵°C

Fig (8) Interaction of pH and time on total phenolic compounds at temperatures 15, 20 and 25°C

شکل ۹ (الف) اثر متقابل pH و دما بر میزان فنول کل را در زمان ثابت ۱۰ دقیقه نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود، افزایش pH و دما تا ۲۰ درجه سانتی گراد میزان فنول کل را افزایش داده است. اثر متقابل pH و دما بر میزان فنول کل در زمان ثابت ۱۵ دقیقه در شکل ۹ (ب) نشان داده شده است. با افزایش pH و دما تا ۲۰ درجه سانتی گراد، میزان استخراج فنول کل نیز افزایش یافت. شکل ۹ (ج) اثر متقابل pH و دما بر میزان فنول کل در زمان ثابت ۲۰ دقیقه را نشان می‌دهد که بیشترین میزان فنول کل در pH برابر ۵ و دمای ۲۰ درجه سانتی گراد مشاهده گردید.

شکل (۹) (الف) اثر متقابل pH و دما بر میزان فنول کل در (الف) زمان

ثابت ۱۰ دقیقه، (ب) زمان ثابت ۱۵ دقیقه و (ج) زمان ثابت ۲۰

دقیقه

Fig (9) Interaction of pH and temperature on total phenolic compounds at 10, 15 and 20 min

بعد باعث کاهش در میزان فنول کل شده است. شکل ۶ (ج) پاسخ فنول کل بر حسب پارامتر زمان را نشان می‌دهد. سایر پارامترها به میزان حد واسط در نظر گرفته شده‌اند (pH برابر ۴ و دما برابر ۲۰ درجه سانتی گراد). همان گونه که در نتایج آنالیز واریانس نیز مشاهده شد افزایش زمان اثر معنی‌داری بر میزان فنول کل داشته است.

شکل (۶) میزان فنول کل بر حسب پارامترهای (الف) pH، (ب) دما و (ج) زمان

Fig (6) The amount of total phenolic compounds in terms of parameters (A) pH (B) Temperature and (C) Time

شکل ۷ (الف) نشان دهنده اثر متقابل دما و زمان بر میزان فنول کل در pH ثابت ۳ می‌باشد. بیشترین میزان فنول کل در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد و کمترین مقدار آن در دمای ۱۵ و ۲۵ درجه سانتی مشاهده شد. افزایش زمان نیز باعث ایجاد روند صعودی در میزان فنول کل گردید. در شکل ۷ (ب) اثر متقابل دما و زمان بر میزان فنول کل در pH ثابت ۴ نشان داده شده است. افزایش زمان و دما تا ۲۰ درجه سانتی گراد موجب افزایش در مقدار فنول کل شده است اما افزایش دما بعد از ۲۰ درجه سانتی گراد باعث کاهش در میزان فنول کل گردید. شکل ۷ (ج) اثر متقابل دما و زمان در pH ثابت ۵ را نشان می‌دهد. با افزایش زمان، میزان فنول کل نیز افزایش یافت. بیشترین مقدار فنول کل نیز در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد بدست آمد.

شکل (۷) اثر متقابل دما و زمان بر میزان فنول کل در (الف) pH

ثابت ۳، (ب) pH ثابت ۴ و (ج) pH ثابت

Fig (7) Interaction of temperature and time on total phenolic compounds at pH 3, 4 and 5

همین دلیل در این پژوهش هرچه زمان افزایش پیدا کرد استخراج بیشتری صورت گرفت.

۳-۳- میزان مهار رادیکال آزاد

مدل پیشنهادی بر اساس داده‌های تجربی واقعی برای پاسخ میزان مهار رادیکال آزاد به صورت دو جمله‌ای درجه دوم به شرح زیر می‌باشد:

معادله (۴)

$$\begin{aligned} DPPH = & -7.88 + 1.15A + 1.74B - 0.88C \\ & + 0.03AB + 0.08AC \\ & + 7.80 \times 10^{-3}BC - 0.18A^2 \\ & - 0.04B^2 + 0.04C^2 \end{aligned}$$

$$(R^2=0.99)$$

جدول (۶) نتایج آنالیز واریانس را برای ارزیابی پارامتر آنتی اکسیدانی چغندر قرمز در مورد مدل درجه سوم با آثار متقابل نشان می‌دهد. با توجه به جدول در مورد میزان مهار رادیکال آزاد چغندر قرمز می‌توان بیان کرد که پارامترهای pH و زمان و دما اثر معنی داری بر میزان مهار رادیکال آزاد چغندر قرمز داشته است. بنابراین تاثیر معنا داری بر مدل داشته است. عدم برازش مدل معنادار نبوده است ($p > 0.05$) به عبارت دیگر مدل داده های تجربی را برازش کرده است. مقدار ضریب تشخیص یا تبیین (R^2) برابر با ۰.۹۹ و بیانگر تطبیق زیاد نتایج مدل با نتایج تجربی بود. R^2 متعادل شده در این مدل ۰.۹۹ بدست آمد که نشان داد تنها یک درصد از متغیرهای کل به وسیله مدل توجیه نشده اند. R^2 پیش بینی شده در این مدل برابر ۰.۹۸ و متناسب با R^2 متعادل شده بود.

جدول (۶) آنالیز واریانس میزان مهار رادیکال آزاد

Table (6) Analysis of variance of free radical inhibition

شکل (۱۰) (الف) میزان مهار رادیکال آزاد را بر حسب پارامتر pH نشان می‌دهد. سایر پارامترها به میزان حد واسطه (دما ۲۰ درجه سانتی گراد و زمان ۱۵ دقیقه) در نظر گرفته شده‌اند. چنان که در شکل مشاهده می‌شود و نتایج مربوط به آنالیز

استخراج ترکیبات فنولی از ماتریس گیاهی تحت تاثیر چندین فاکتور از قبیل ماهیت شیمیایی آن‌ها، روش استخراج، اندازه ذرات، زمان و شرایط نگهداری و حضور مواد مداخله کننده است. ترکیبات فنولی ممکن است گروه‌های هیدروکسیل مختلفی داشته باشند که می‌توانند با قند، اسید یا گروه‌های الکیل درآمیخته شده باشند. در نتیجه، قطبیت ترکیبات فنولی بسیار متفاوت است و بهبود یک روش تکی برای استخراج موثر ترکیبات فنولی بسیار مشکل است. بنابراین، بهینه سازی فرآیند استخراج برای ارزیابی دقیق ترکیبات فنولی از ماتریس مختلف مواد غذایی ضروری است [18]. شرایط اسیدی در استخراج ترکیبات فنولی به روش‌های مختلف عمل می‌کند. اولین روش، افزایش پایداری ترکیبات فنولیک مانند آنتوسیانین‌ها می‌باشد. دومین روش، انحلال ترکیبات فنولی با مکانیسم هیدرولیز است که در ابتدا بخشی از پلیمرها هستند یا با اجزاء دیواره سلولی پیوند برقرار کرده‌اند و سومین روش، تخریب دیواره سلولی و بنابراین تسهیل حلالیت و انتشار ترکیبات فنولیک از مواد گیاهی است [12]. نتایج نشان داد که افزایش دما تا ۲۰ درجه باعث افزایش ترکیبات فنولی می‌شود و دمای بالای ۲۰ درجه باعث کاهش ترکیبات فنولی شد. افزایش میزان ترکیبات فنولی که با افزایش دما در ابتدا مشاهده شد را می‌توان به نرم شدن بافت گیاهی و برهم زدن برهم کنش بین ترکیبات فنولی و پروتئین یا کربوهیدرات‌ها در نتیجه بهبود سرعت انتشار نسبت داد [19]. با این حال لازم به ذکر است که افزایش دمای استخراج بیش تر از یک مقدار مشخص ممکن است باعث تخریب ترکیبات فنولی که قبلاً در دمای پایین متحرک شده‌اند یا حتی تجزیه فنول‌های باقی مانده در ماتریس گیاهی شود. علاوه بر این، درجه حرارت بالا ممکن است باعث کاهش میزان حلال از طریق تبخیر و افزایش هزینه استخراج از نقطه نظر صنعتی شود [18]. زمان همواره میزان ترکیبات استخراج شده را افزایش می‌دهد علت آن است که باید برای ایجاد حفره در غشای سلول های چغندر زمان کافی داده شود تا با ایجاد حفره در غشا استخراج راحت تر صورت گیرد به

در pH ثابت ۴ را نشان می‌دهد که افزایش دما تا ۲۰ درجه سانتی گراد باعث ایجاد روند صعودی در میزان مهار رادیکال آزاد شد اما بعد از ۲۰ درجه سانتی گراد این روند نزولی گردید. اثر متقابل دما و زمان در pH ثابت ۵ در شکل ۱۱ (ج) نشان داده شده است. افزایش زمان و دما تا ۲۰ درجه سانتی گراد باعث افزایش میزان مهار رادیکال آزاد شده است.

شکل (۱۱) اثر متقابل دما و زمان بر میزان مهار رادیکال آزاد در

(الف) pH ثابت ۳، (ب) pH ثابت ۴ و (ج) pH ثابت ۵

Fig (11) Interaction of temperature and time on free radical inhibition at pH 3, 4 and 5

اثر متقابل pH و زمان بر میزان مهار رادیکال آزاد در دمای ثابت ۱۵ درجه سانتی گراد در شکل ۱۲ (الف) نشان داده شده است. با افزایش pH و زمان میزان مهار رادیکال آزاد نیز افزایش یافت. اثر متقابل pH و زمان بر میزان مهار رادیکال آزاد در دمای ثابت ۲۰ درجه سانتی گراد در شکل ۱۲ (ب) مشاهده می‌شود. با افزایش pH و زمان میزان مهار رادیکال آزاد افزایش یافت. در شکل ۱۲ (ج) اثر متقابل pH و زمان بر میزان مهار رادیکال آزاد در دمای ثابت ۲۵ درجه سانتی گراد نشان داده شده است. بیش‌ترین میزان مهار رادیکال آزاد در زمان ۲۰ دقیقه و pH برابر ۵ مشاهده گردید.

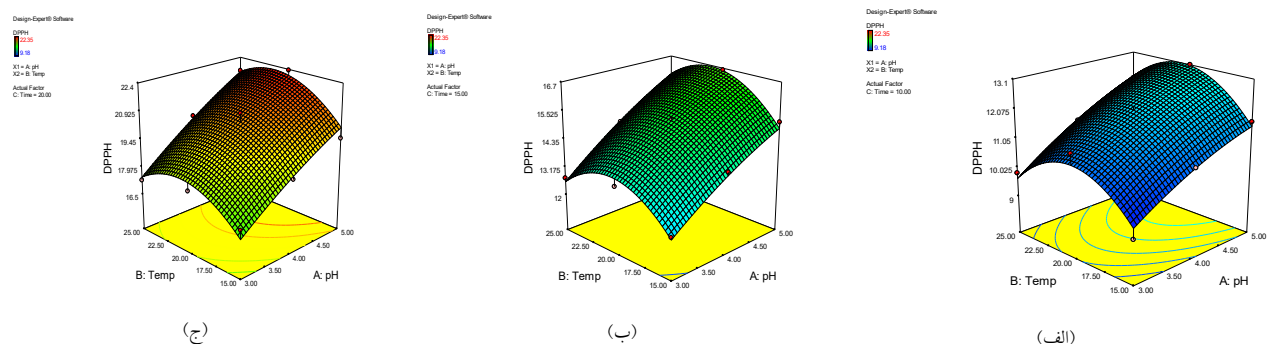
واریانس نیز نشان داد پارامتر pH باعث افزایش معنی دار در میزان مهار رادیکال آزاد گردید. پاسخ میزان مهار رادیکال آزاد بر حسب پارامتر دما در شکل ۱۰ (ب) نشان داده شده است و سایر پارامترها به میزان حد واسطه در نظر گرفته شده‌اند (pH برابر ۴ و زمان ۱۵ دقیقه). افزایش دما تا ۲۰ درجه سانتی گراد باعث افزایش معنی دار در میزان مهار رادیکال آزاد گردید اما با افزایش دما از ۲۰ درجه سانتی گراد به بعد میزان مهار رادیکال آزاد کاهش یافت. همچنین شکل ۱۰ (ج) پاسخ میزان مهار رادیکال آزاد را بر حسب پارامتر زمان نشان می‌دهد (سایر پارامترها به میزان حدواسطه در نظر گرفته شده‌اند). افزایش زمان از ۱۰ تا ۲۰ دقیقه باعث افزایش معنی دار در میزان مهار رادیکال آزاد گردید.

شکل (۱۰) میزان مهار رادیکال آزاد بر حسب پارامترهای (الف)

pH، (ب) دما و (ج) زمان

Fig (10) The amount of free radical inhibition in terms of parameters (A) pH (B) Temperature and (C) Time

شکل (۱۱) (الف) اثر متقابل دما و زمان بر میزان مهار رادیکال آزاد در pH ثابت ۳ را نشان می‌دهد، چنان که در شکل مشاهده می‌شود افزایش زمان از ۱۰ تا ۲۰ دقیقه و افزایش دما از ۱۵ تا ۲۵ درجه سانتی گراد موجب افزایش در میزان مهار رادیکال آزاد شده است. شکل ۱۱ (ب) اثر متقابل دما و زمان



شکل (۱۲) اثر متقابل pH و زمان بر میزان مهار رادیکال آزاد در (الف) دمای ثابت ۱۵°C، (ب) دمای ثابت ۲۰°C و (ج) دمای ثابت ۲۵°C

Fig (12) Interaction of pH and time on free radical inhibition at temperatures 15, 20 and 25°C

اکسیدانی وجود دارد. فعالیت آنتی‌اکسیدانی ترکیبات فنولی به ساختار مولکولی آن‌ها مانند در دسترس بودن هیدروژن-های فنولیک و امکان پایداری رادیکال‌های فنوکسیل تشکیل شده از طریق دادن هیدروژن بستگی دارد [5]. بنابراین با توجه به نتایجی که در این تحقیق بدست آمده است می‌توان بیان کرد که افزایش در مقدار pH و زمان باعث افزایش میزان ترکیبات فنولی و در نتیجه افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی می‌شود. در این رابطه آلوسمن^{۱۵} و همکاران (۲۰۰۹) به این نتیجه رسیدند که همبستگی خوبی میان محتوای ترکیبات فنولی و فعالیت آنتی‌اکسیدانی وجود دارد [20].

۳-۴- معتبر سازی مدل

میانگین مواد جامد محلول، فنول کل و میزان مهار رادیکال آزاد تحت شرایط بهینه در جدول ۷ نشان داده شده است. مقایسه مقادیر پاسخ‌های پیش بینی شده و آزمایشگاهی در نقطه بهینه پیشنهادی توسط نرم افزار از طریق آزمون تی استیودنت ($p < 0.05$) نشان دهنده همبستگی بسیار خوب بین نتایج بود.

جدول (۷) مقادیر مواد جامد محلول و ترکیبات فنولی و مهار رادیکال آزاد پیش‌بینی شده و آزمایشگاهی به دست آمده در نقطه

بهینه

Table (7) Predicted soluble solids, phenolic compounds and Free radical scavenging activity and experimental data obtained at optimum point

۴. نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که هر چه pH نمونه افزایش یابد میزان مواد جامد محلول، ترکیبات فنولی و آنتی‌اکسیدانی افزایش می‌یابد. با افزایش زمان استخراج نیز به دلیل مهیا شدن زمان کافی برای ایجاد حفره در غشای سلول‌های چغندر و راحت‌تر شدن فرآیند استخراج مقدار این پاسخ‌ها افزایش یافتند.

شکل ۱۳ (الف) اثر متقابل pH و دما روی میزان مهار رادیکال آزاد در زمان ثابت ۱۰ دقیقه را نشان می‌دهد. افزایش pH از ۳ تا ۵ و افزایش دما از ۱۵ تا ۲۰ درجه سانتی گراد باعث افزایش میزان مهار رادیکال آزاد گردید. شکل ۱۳ (ب) اثر متقابل pH و دما روی میزان مهار رادیکال آزاد در زمان ثابت ۱۵ دقیقه را نشان می‌دهد. چنان که مشاهده می‌شود، هر چه pH افزایش یافته است میزان مهار رادیکال آزاد بیش‌تر شده است. افزایش دما تا ۲۰ درجه سانتی گراد موجب افزایش میزان مهار رادیکال آزاد گردید اما از ۲۰ درجه سانتی گراد به بعد با افزایش دما میزان مهار رادیکال آزاد کاهش یافت. در شکل ۱۳ (ج) اثر متقابل pH و دما روی میزان مهار رادیکال آزاد در زمان ثابت ۲۰ دقیقه نشان داده شده است که بیش‌ترین میزان مهار رادیکال آزاد در pH برابر ۵ و دمای ۲۰ درجه سانتی گراد مشاهده شد.

شکل (۱۳) اثر متقابل pH و دما بر میزان مهار رادیکال آزاد در (الف) زمان ثابت ۱۰ دقیقه، (ب) زمان ثابت ۱۵ دقیقه و (ج) زمان ثابت ۲۰ دقیقه

Fig (13) Interaction of pH and temperature on free radical inhibition at 10, 15 and 20 min

نتایج به دست آمده نشان داد که افزایش زمان اثر معنی‌داری بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی داشته و دمای ۲۰ درجه باعث افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی شده است. چیرینوس^{۱۳} و همکاران (۲۰۰۷) نیز مشاهده کردند که با افزایش زمان استخراج فعالیت آنتی‌اکسیدانی به طور معنی‌داری افزایش یافت. همچنین افزایش pH سبب افزایش فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی شد زیرا فعالیت آنتی‌اکسیدان‌ها در pH خنثی و بازی بیشتر است [6]. برون^{۱۴} و همکاران (۲۰۱۱) مشاهده کردند که در ریشه چغندر همبستگی بسیار معنی‌داری بین محتوای ترکیبات فنولی و بتاگزانترین‌ها با فعالیت آنتی

¹⁵. Alothman

¹³. Chirinos

¹⁴. Brunet

conventional thawing," *Food Science and Technology International*, vol. 28, no. 8, pp. 728-734, 2022.

[۱۰] F. Barati, N. Zamindar, and S. Rafiaei, "The Study of Kinetics of Polyphenol Oxidase Inactivation in Carrot Juice by Ohmic Heating," *Iranian journal of food science and industry*, vol. 21, no. 153, 2024.

[۱۱] S. Rafiaei and N. Zamindar, "Investigating the effect of ohmic and water bath heating on surviving of *Escherichia coli*," *Journal of food science and technology (Iran)*, vol. 2, no. 158, pp. 50-62, 2025.

[۱۲] R. Kushwaha, V. Kumar, G. Vyas, and J. Kaur, "Optimization of different variable for eco-friendly extraction of betalains and phytochemicals from beetroot pomace," *Waste and Biomass Valorization*, vol. 9, no. 9, pp. 1485-1.۲۰۱۸, ۴۹۴

[۱۳] D. R. De Sotillo, M. Hadley, and E. Holm, "Phenolics in aqueous potato peel extract: extraction, identification and degradation," *Journal of Food Science*, vol. 59, no. 3, pp. 649-651, 1994.

[۱۴] A. o. O. A. Chemists and A. o. O. A. Chemists, *Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists*. Association of Official Analytical Chemists., 1920.

[۱۵] C.-C. Chang, M.-H. Yang, H.-M. Wen, and J.-C. Chern, "Estimation of total flavonoid content in propolis by two complementary colorimetric methods," *Journal of food and drug analysis*, vol. 10, no. 3, 2002.

[۱۶] K. M. Herbach, F. C. Stintzing, and R. Carle, "Betalain stability and degradation—structural and chromatic aspects," *Journal of food science*, vol. 71, no. 4, pp. R41-R50, 2006.

[۱۷] M. Lavarestagh, N. Zamindar, and Y. Esmaeili, "Optimization of Pigment Extraction from Red Beet," *Optimization*, vol. 20, no. 4, pp. 381-393, 2024.

[۱۸] A. Mokrani and K. Madani, "Effect of solvent, time and temperature on the extraction of phenolic compounds and antioxidant capacity of peach (*Prunus persica* L.) fruit," *Separation and purification Technology*, vol. 162, pp. 68-76, 2016.

[۱۹] G. J. Swamy, A. Sangamithra, and V. Chandrasekar, "Response surface modeling and process optimization of aqueous extraction of natural pigments from *Beta vulgaris* using Box-Behnken design of experiments," *Dyes and Pigments*, vol. 111, pp. 64-74, 2014.

[۲۰] M. Alothman, R. Bhat, and A. Karim, "Antioxidant capacity and phenolic content of selected tropical fruits from Malaysia, extracted with

همچنین افزایش دما تا ۲۰ درجه سانتی گراد میزان مواد جامد محلول کل، ترکیبات فنولی و آنتی اکسیدانی را افزایش داد اما در دماهای بالاتر از ۲۰ درجه سانتی گراد این مقادیر کاهش یافتند.

۵-منابع

[۱] Y. Cai, M. Sun, and H. Corke, "Antioxidant activity of betalains from plants of the Amaranthaceae," *Journal of agricultural and food chemistry*, vol. 51, no. 8, pp. 2288-2294, 2003.

[۲] J. Czapski, K. Mikołajczyk, and M. Kaczmarek, "Relationship between antioxidant capacity of red beet juice and contents of its betalain pigments," *Polish journal of food and nutrition sciences*, vol. 59, no. 2, 2009.

[۳] H. Righi Pessoa da Silva, C. da Silva, and B. C. Bolanho, "Ultrasonic-assisted extraction of betalains from red beet (*Beta vulgaris* L.)," *Journal of food process engineering*, vol. 41, no. 6, p. e12833, 2018.

[۴] Q. D. Do *et al.*, "Effect of extraction solvent on total phenol content, total flavonoid content, and antioxidant activity of *Limnophila aromatica*," *Journal of food and drug analysis*, vol. 22, no. 3, pp. 296-302, 2014.

[۵] J. M. Čanadanović-Brunet *et al.*, "Antioxidant and antimicrobial activities of beet root pomace extracts," *Czech journal of food sciences*, vol. 29, no. 6, p. 575, 2011.

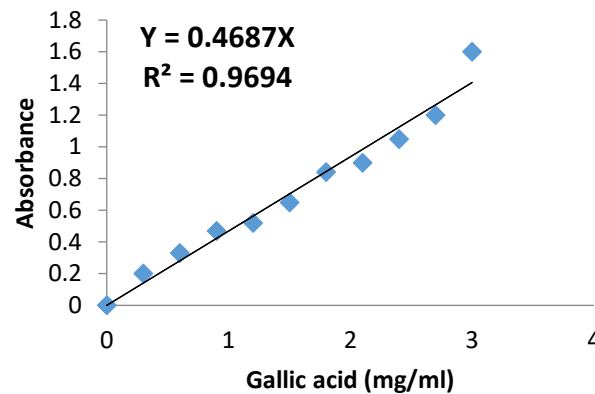
[۶] R. Chirinos, H. Rogez, D. Campos, R. Pedreschi, and Y. Larondelle, "Optimization of extraction conditions of antioxidant phenolic compounds from mashua (*Tropaeolum tuberosum* Ruiz & Pavón) tubers," *Separation and Purification Technology*, vol. 55, no. 2, pp. 217.۲۰۰۷, ۲۲۵-

[۷] M. Keshani and R. Hajian, "Effect of immersion ohmic heating on thawing rate and properties of frozen tuna fish," 2020.

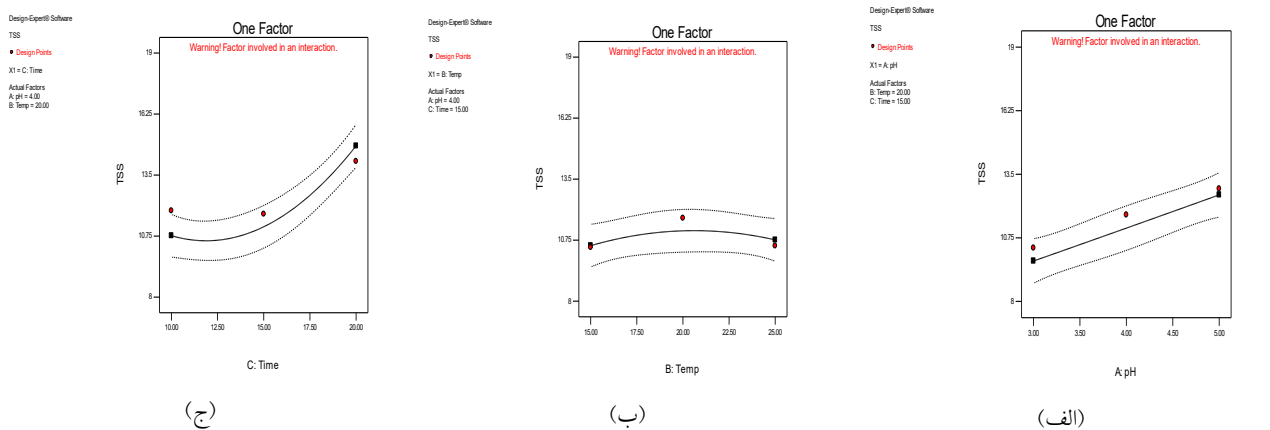
[۸] N. Z. Maryam Keshani, Leila Lakzadeh, Mohammad Goli, "Optimizing the foaming capacity and stability of extracted sesame flour protein using ohmic method," presented at the Iran's 5th conference on Protein & Peptide Science, University of Tehran, 2024, 2024.

[۹] M. Keshani, N. Zamindar, and R. Hajian, "Physicochemical properties of frozen tuna fish as affected by immersion ohmic thawing and

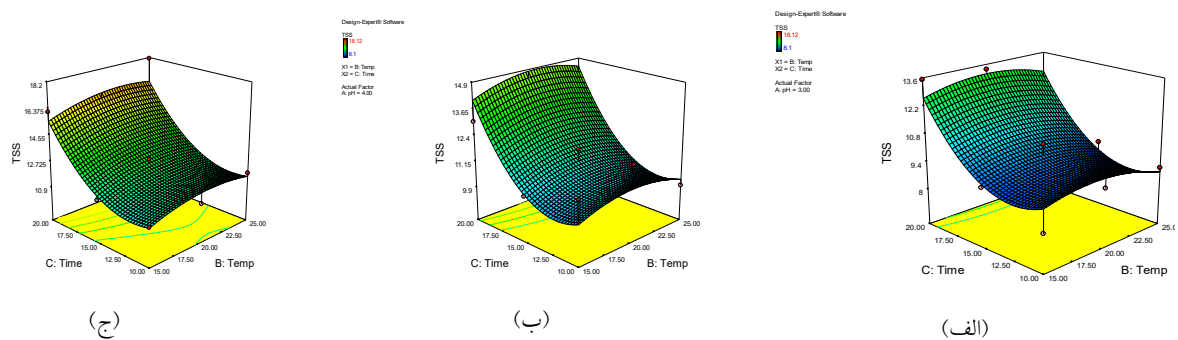
different solvents," *Food chemistry*, vol. 115, no. 3, pp. 785-788, 2009.



شکل (۱) نمودار استاندارد ترکیبات فنولیک برحسب گالیک اسید (میلی گرم بر میلی لیتر)
Fig(1) Standard graph for phenolic compounds according to gallic acid equivalent (mg/ml)

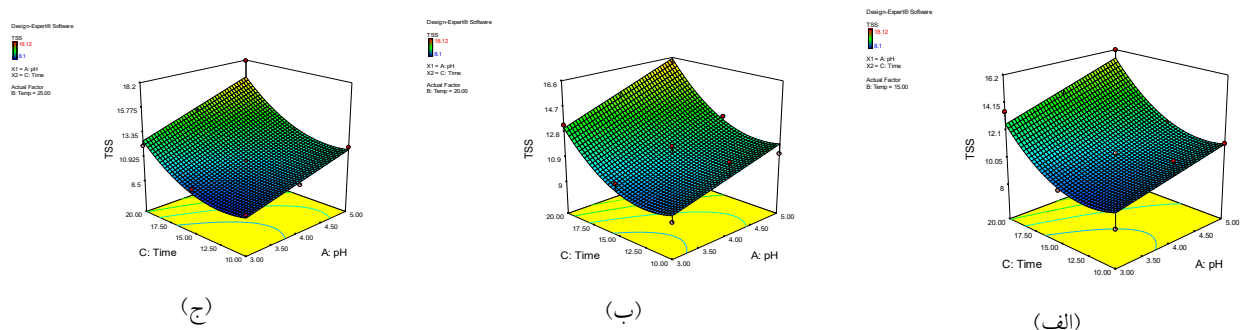


شکل ۲- میزان مواد جامد محلول بر حسب پارامترهای (الف) pH، (ب) دما و (ج) زمان
Fig (2) The amount of soluble solids in terms of parameters (A) pH (B) Temperature (C) Time



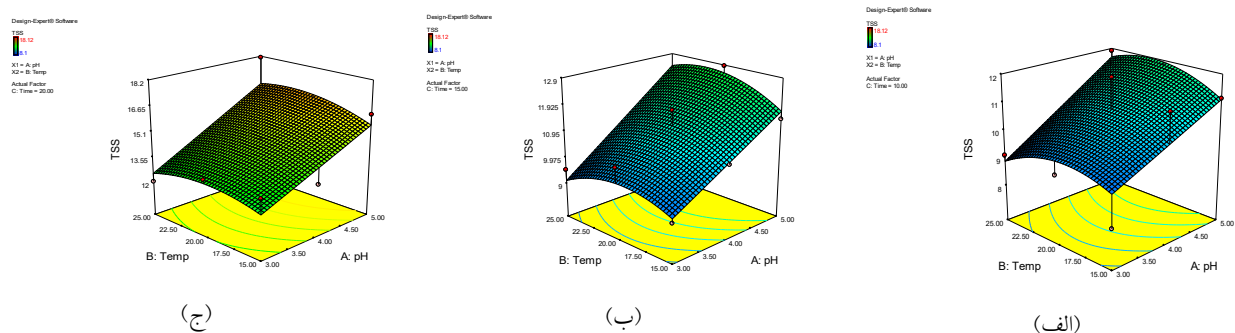
شکل ۳- اثر متقابل دما و زمان بر میزان مواد جامد محلول در (الف) pH ثابت ۳، (ب) pH ثابت ۴ و (ج) pH ثابت ۵

Fig (3) Interaction of temperature and time on soluble solids constant pH 3, 4 and 5



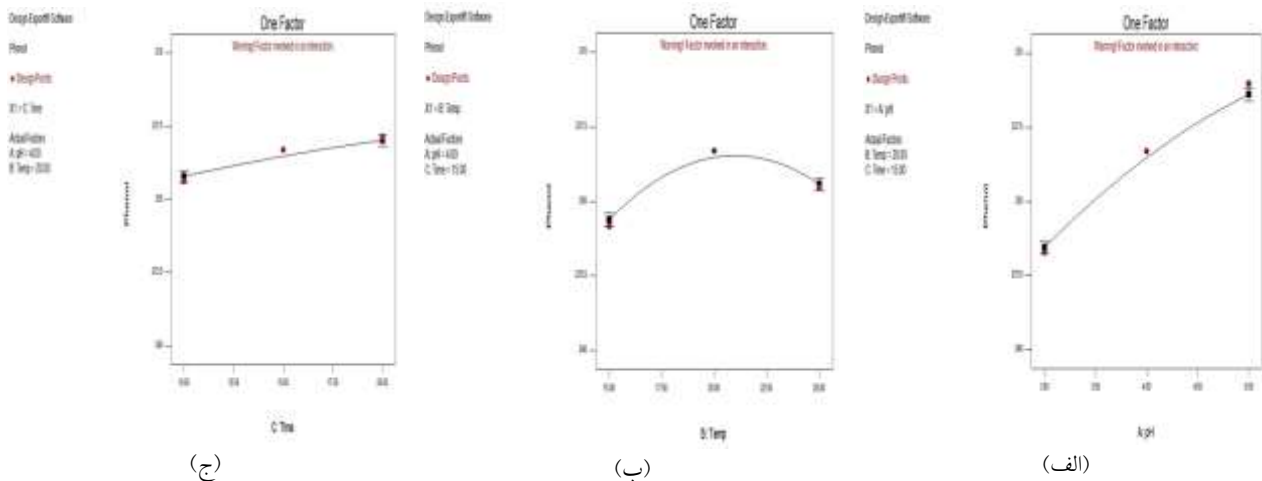
شکل ۴- اثر متقابل pH و زمان بر میزان مواد جامد محلول در (الف) دمای ثابت ۱۵°C، (ب) دمای ثابت ۲۰°C و (ج) دمای ثابت ۲۵°C

Fig (4) Interaction of pH and time on soluble solids constant temperatures 15, 20 and 25°C



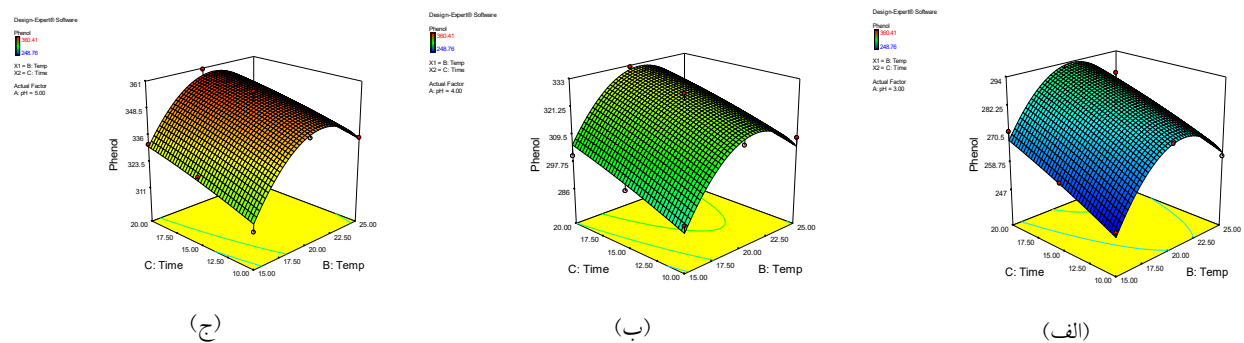
شکل ۵- اثر متقابل pH و دما بر میزان مواد جامد محلول در (الف) زمان ثابت ۱۰ دقیقه، (ب) زمان ثابت ۱۵ دقیقه و (ج) زمان ثابت ۲۰ دقیقه

Fig(5) Interaction of pH and temperature on soluble solids constant times of 10, 15 and 20 min



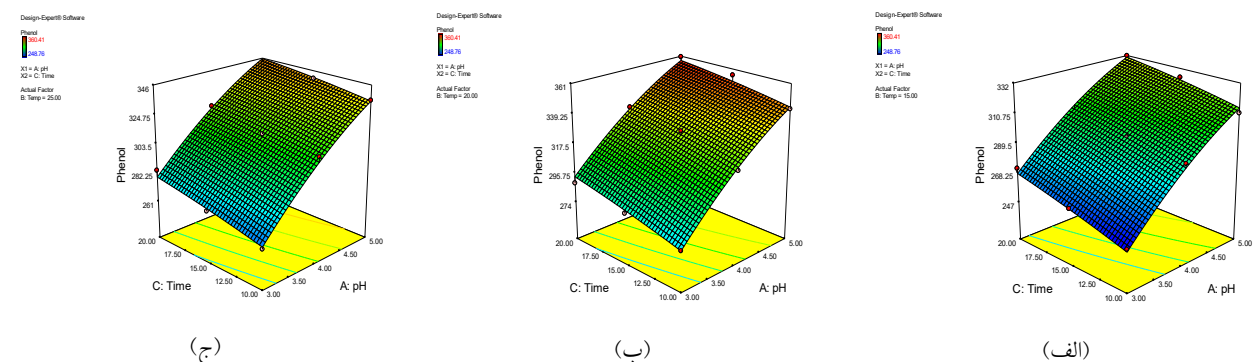
شکل ۶- میزان فنول کل بر حسب پارامترهای (الف) pH، (ب) دما و (ج) زمان

Fig (6) The amount of total phenolic compounds in terms of parameters (A) pH, (B) Temperature and (C) Time



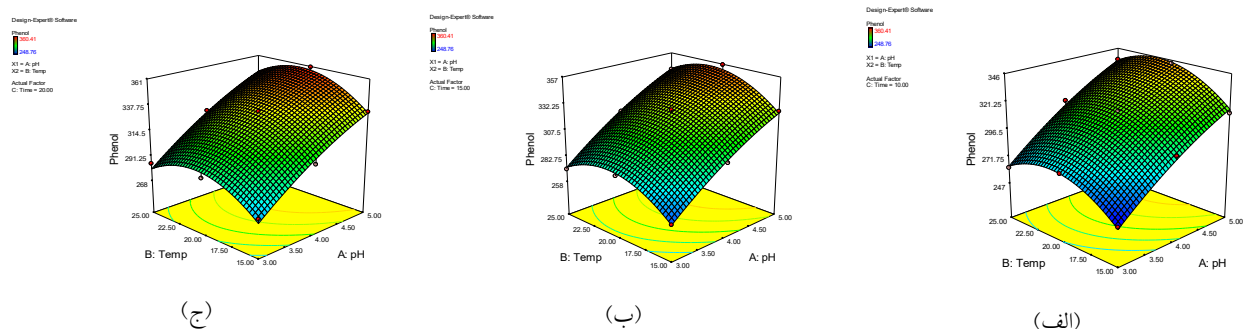
شکل ۷- اثر متقابل دما و زمان بر میزان فنول کل در (الف) pH ثابت ۳، (ب) pH ثابت ۴ و (ج) pH ثابت ۵

Fig (7) Interaction of temperature and time on total phenol constant pH of 3, 4 and 5



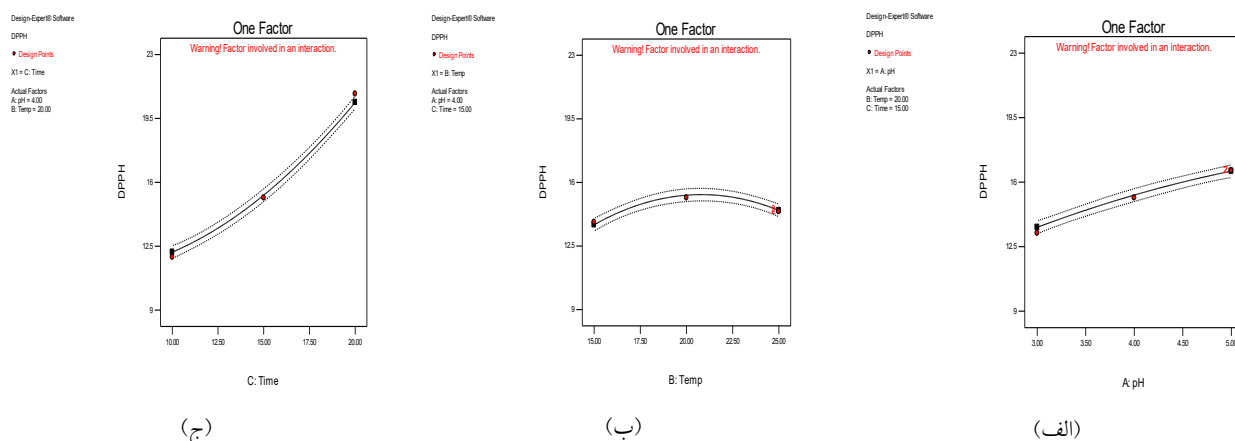
شکل ۸- اثر متقابل pH و زمان بر میزان فنول کل در (الف) دمای ثابت ۱۵°C، (ب) دمای ثابت ۲۰°C و (ج) دمای ثابت ۲۵°C

Fig (8) Interaction of pH and time on total phenol constant temperatures of 15, 20 and 25°C



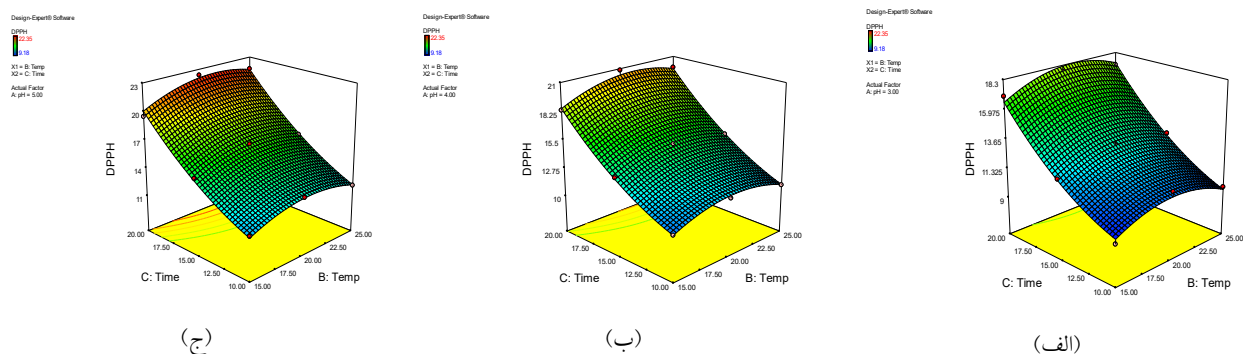
شکل ۹- اثر متقابل pH و دما بر میزان فنول کل در (الف) زمان ثابت ۱۰ دقیقه، (ب) زمان ثابت ۱۵ دقیقه و (ج) زمان ثابت ۲۰ دقیقه

Fig (9) Interaction of pH and temperature on total phenol constant times of 10, 15 and 20 min



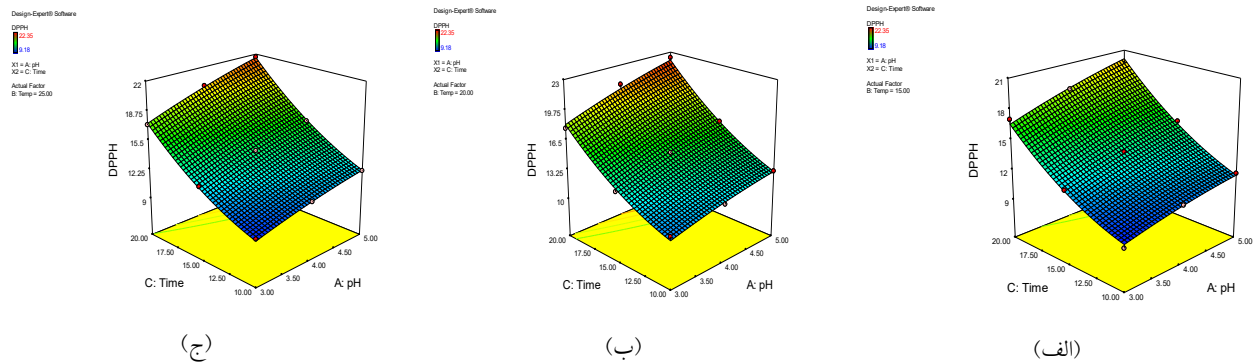
شکل ۱۰- میزان مهار رادیکال آزاد بر حسب پارامترهای (الف) pH، (ب) دما و (ج) زمان

Fig (10) The amount of free radical inhibition in terms of parameters (A) pH, (B) Temperature and (C) Time



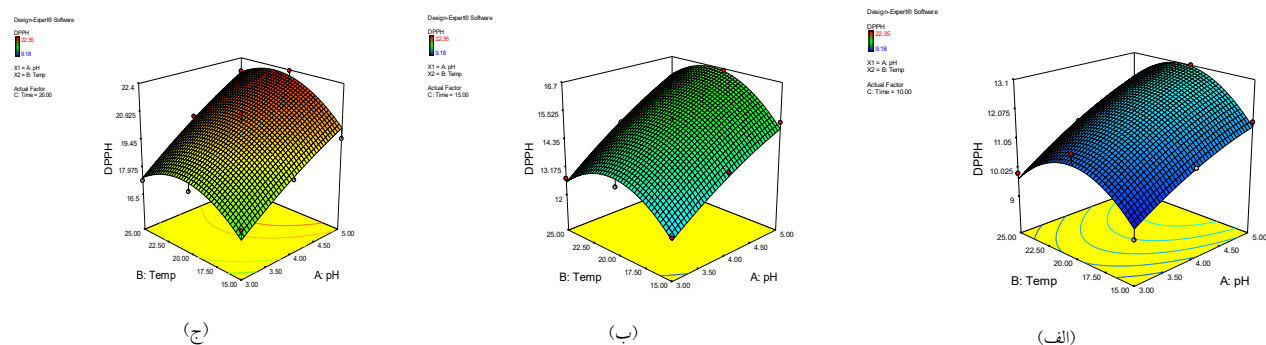
شکل ۱۱- اثر متقابل دما و زمان بر میزان مهار رادیکال آزاد در (الف) pH ثابت ۳، (ب) pH ثابت ۴ و (ج) pH ثابت ۵

Fig (11) Interaction of temperature and time on free radical inhibition constant pH of 3, 4 and 5



شکل ۱۲- اثر متقابل pH و زمان بر میزان مهار رادیکال آزاد در (الف) دمای ثابت ۱۵°C، (ب) دمای ثابت ۲۰°C و (ج) دمای ثابت ۲۵°C

Fig (12) Interaction of pH and time on free radical inhibition constant temperatures 15, 20 and 25°C



شکل ۱۳- اثر متقابل pH و دما بر میزان مهار رادیکال آزاد در (الف) زمان ثابت ۱۰ دقیقه، (ب) زمان ثابت ۱۵ دقیقه و (ج) زمان ثابت ۲۰ دقیقه

Fig (13) Interaction of pH and temperature on free radical inhibition constant times 10, 15 and 20 min

جدول ۱- نمایش متغیرهای مستقل فرآیند و مقادیر آنها

Table (1) Display process independent variables and their values

سطوح متغیرهای مورد بررسی در پژوهش			
سطح			
متغیرهای مستقل	۱+	۰	۱-
pH	۵	۴	۳
دما (C°)	۲۵	۲۰	۱۵
زمان (min)	۲۰	۱۵	۱۰

جدول ۲- تیمارهای مربوط به استخراج عصاره از چغندر قرمز

Table (2) Treatments for extraction of red beet

تیمار	pH	دما (°C)	زمان (min)	تیمار	pH	دما (°C)	زمان (min)
۱	۳	۱۵	۱۰	۱۶	۴	۲۵	۱۰
۲	۳	۱۵	۱۵	۱۷	۴	۲۵	۱۵
۳	۳	۱۵	۲۰	۱۸	۴	۲۵	۲۰
۴	۳	۲۰	۱۰	۱۹	۵	۱۵	۱۰
۵	۳	۲۰	۱۵	۲۰	۵	۱۵	۱۵
۶	۳	۲۰	۲۰	۲۱	۵	۱۵	۲۰
۷	۳	۲۵	۱۰	۲۲	۵	۲۰	۱۰
۸	۳	۲۵	۱۵	۲۳	۵	۲۰	۱۵
۹	۳	۲۵	۲۰	۲۴	۵	۲۰	۲۰
۱۰	۴	۱۵	۱۰	۲۵	۵	۲۵	۱۰
۱۱	۴	۱۵	۱۵	۲۶	۵	۲۵	۱۵
۱۲	۴	۱۵	۲۰	۲۷	۵	۲۵	۲۰
۱۳	۴	۲۰	۱۰	۲۸	۴	۲۰	۱۵
۱۴	۴	۲۰	۱۵	۲۹	۴	۲۰	۱۵
۱۵	۴	۲۰	۲۰				

جدول ۳- سطوح پارامترهای فرآیند برای نقطه بهینه

Table (3) Process parameter levels for the optimal point

سطوح بهینه پارامترهای فرآیند				
	pH	دما (°C)	زمان (min)	مطلوبیت
۱	۵.۰۰	۲۱.۳۲۸	۲۰	۰.۹۳۷

جدول ۴- آنالیز واریانس مواد جامد محلول

Table (4) Analysis of variance soluble solids

منابع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F Value	p-value Prob>F	
مدل	130/83	9	14/54	20//15	<۰/۰۰۰۱	معنی دار
A-pH	36/84	1	36/84	51/05	<۰/۰۰۰۱	
B-Temp	0/307	1	0/307	0/425	0/5222	
C-Time	73/69	1	73/69	102/13	<۰/۰۰۰۱	

AB	0/644	1	0/644	0/8926	0/3566	
AC	0/859	1	0/859	1/19	0/2890	
BC	0/080	1	0/080	0/1109	0/7427	
A ²	0/0000	1	0/0000	0/0000	0/9970	
B ²	1/98	1	1/98	2/74	0/1142	
C ²	17/37	1	17/37	24/07	<0/0001	
باقیمانده (Residual)	13/71	19	0/7215			
عدم برازش (Lack of Fit)	13/45	17	0/7912	6/10	0/1499	غیرمعنی دار
خطای خالص (Pure Error)	0.2599	2	0/1297			
Cor Total	۱۴۴/۵۴	۲۸				

جدول ۵- آنالیز واریانس کل ترکیبات فنولی

Table (5) Analysis of variance of total phenolic compounds

منابع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F Value	p-value Prob>F	
مدل	۲۵۶۹۸/۸۴	۹	۲۸۵۵/۴۳	۲۴۸/۹۱	<0/0001	معنی دار
A-pH	۲۰۲۹۶/۴۲	۱	۲۰۲۹۶/۴۲	۱۷۶۹/۲۳	<0/0001	
B-Temp	۱۰۷۰/۱۵	۱	۱۰۷۰/۱۵	۹۳/۲۸	<0/0001	
C-Time	۱۱۵۵/۲۰	۱	۱۱۵۵/۲۰	۱۰۰/۷۰	<0/0001	
AB	۱۰/۳۰	۱	۱۰/۳۰	۰/۸۹۸۲	۰/۳۵۵۲	
AC	۱۹/۹۷	۱	۱۹/۹۷	۱/۷۴	۰/۲۰۲۷	
BC	۱۸/۱۱	۱	۱۸/۱۱	۱/۵۸	۰/۲۲۴۲	
A ²	۲۴۲/۷۱	۱	۲۴۲/۷۱	۲۱/۱۶	۰/۰۰۰۲	
B ²	۲۵۵۹/۸۸	۱	۲۵۵۹/۸۸	۲۲۳/۱۴	<0/0001	
C ²	۷/۹۰	۱	۷/۹۰	۰/۶۸۹۰	۰/۴۱۶۸	
باقیمانده (Residual)	۲۱۷/۹۷	19	۱۱/۴۷			
عدم برازش (Lack of Fit)	۲۱۵/۹۱	17	۱۲/۷۰	۱۲/۳۳	0.0755	غیرمعنی دار
خطای خالص (Pure Error)	۲/۰۶	2	۱/۰۳			

Cor Total	۱۶۲۵۹/۸۰	۲۸				
جدول ۶- آنالیز واریانس پاسخ میزان مهار رادیکال آزاد						
Table (6) Analysis of variance of free radical inhibition response						
منابع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F Value	p-value Prob>F	
مدل	۳۶۵/۴۳	۹	۴۰/۶۰	۴۰۳/۳۰	<۰/۰۰۰۱	معنی دار
A-pH	۴۱/۸۰	۱	۴۱/۸۰	۴۱۵/۱۹	<۰/۰۰۰۱	
B-Temp	۲/۸۰	۱	۲/۸۰	۲۶/۸۲	<۰/۰۰۰۱	
C-Time	۳۰۳/۰۷	۱	۳۰۳/۰۷	۳۰۱۰/۲۷	<۰/۰۰۰۱	
AB	۰/۲۸۸۳	۱	۰/۲۸۸۳	۲/۸۶	۰/۱۰۶۹	
AC	۱/۹۴	۱	۱/۹۴	۱۹/۲۳	۰/۰۰۰۳	
BC	۰/۴۵۶۳	۱	۰/۴۵۶۳	۴/۵۳	۰/۰۴۶۶	
A ²	۰/۲۱۹۲	۱	۰/۲۱۹۲	۲/۱۸	۰/۱۵۶۴	
B ²	۹/۴۱	۱	۹/۴۱	۹۳/۵۰	<۰/۰۰۰۱	
C ²	۶/۹۶	۱	۶/۹۶	۶۹/۱۷	<۰/۰۰۰۱	
باقیمانده (Residual)	۱/۹۱	۱۹	۰/۱۰۰۷			
عدم برازش (Lack of Fit)	۱/۸۹	۱۷	۰/۱۱۱۳	۱۱/۳۳	0.0855	غیر معنی دار
خطای خالص (Pure Error)	۰/۰۲۰۰	۲	۰/۰۱۰۰			
Cor Total	۳۶۷/۳۴	۲۸				

جدول ۷- مقادیر مواد جامد محلول و مواد فنولی و مهار رادیکال آزاد پیش‌بینی شده و آزمایشگاهی به دست آمده در نقطه بهینه

Table (7) Predicted soluble solids, phenolic compounds and free radical scavenging activity and laboratory results obtained at optimum point

Laboratory results obtained at optimum point						
Total soluble solids (%)	Total phenolic compounds (µg GA/ml)	DPPH (%)	پارامترهای	بهینه	سطوح	مقادیر پیش‌بینی شده
			زمان	دما (°C)	فرآیند	
			(min)			
۱۶/۶۰۲ ^a	۳۵۸/۳۱۰ ^a	۲۲/۱۸ ^a	۲۰	۲۱.۳۲۸	۵.۰۰	

مقادیر	۵.۰۰	۲۱.۳۲۸	۲۰	$21/995 \pm 0/30^a$
آزمایشگاهی				$359/10 \pm 0/78^a$
				$16.613 \pm 0/027^a$

حروف غیر مشترک در هر ستون بیانگر تفاوت معنی دار بر اساس آزمون T-Test در سطح احتمال ۵ درصد است.



Scientific Research

Optimization of Phenolic Compounds and Antioxidant Activity of Ultrasound Assisted Extraction of Red Beet

Mahshad Lavarestagh¹, Nafiseh Zamindar^{2*}, Maryam Keshani^{1,3}

1,3-Graduated Master Student, Department of Food Science and Technology, Institute of Agriculture, Water, Food, and Nutraceuticals, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran

2-Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Institute of Agriculture, Water, Food, and Nutraceuticals, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran

3-PhD Student, Department of Food Science and Technology, Shah.C., Islamic Azad University, Shahreza, Iran

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Article History: Received:2023/02/19 Accepted:2025/07/29 Keywords: Red Beet, Ultrasound, Phenolic Compounds, Antioxidant activity, Response Surface Method DOI:10.48311/fsct.2026.83395.0. *Corresponding Author E- n.zamindar@iau.ac.ir	The red beet (<i>Beta vulgaris</i> L.) root is a significant botanical raw material with proven positive effects on the human body. This plant contains a substantial number of antioxidants, vitamins, fiber, and natural pigments. Additionally, it is rich in phenolic compounds with antioxidant properties. This study investigated the influence of pH (3-5), temperature (15-25 °C), and extraction time (10-20 minutes) on the concentration of soluble solids, phenolic compounds, and antioxidant activity of the red beet root extract obtained. The extraction process was performed using water: ethanol (1:1 ratio) mixture. Ultrasonic waves with an intensity of 75% and a frequency of 37 kHz were employed to facilitate the extraction process. Design Expert software and response surface optimization method were used for analysis. The results indicated that an increase in pH and extraction time led to higher concentrations of total soluble solids, phenols, and antioxidant activity. Moreover, elevating the temperature up to 20°C increased these responses, but temperatures exceeding 20°C resulted in a decline in these values. The experimental results obtained at optimal point suggested by the software did not show a significant difference compared to the predicted results by the model ($p < 0.05$).