

کاربرد سطح پاسخ در بهینه‌سازی استخراج روغن از مغز گردو و هسته میوه انبه با استفاده از امواج فراصوت

انور شلماشی^{۱*}، فاطمه امانی^۲

۱. دانشیار، گروه صنایع شیمیایی آلی و دارویی، پژوهشکده فناوری‌های شیمیایی، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران
۲. دانش آموخته کارشناس ارشد، گروه شیمی آلی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد، واحد تهران مرکز

(تاریخ دریافت: 94/9/18، تاریخ پذیرش: 94/11/11)

چکیده

گردو و انبه از درختان بومی مناطق گرمسیر می‌باشند. مغز گردو منبع غنی از روغن با ارزش غذایی بالا است. هسته میوه انبه نیز حاوی روغن با درصد بالای اسید چرب اشباع با قابلیت کاربرد به‌عنوان ماده اولیه برای تهیه سوخت‌های زیستی است. در مقاله حاضر، برای استخراج روغن از مغز گردو و هسته انبه با استفاده از هگزان از امواج فراصوت استفاده و نتایج با استخراج به شیوه سوکسله در مدت زمان 6 ساعت مقایسه شد. در این مطالعه، برای بررسی و بهینه‌سازی سه فاکتور زمان، دمای استخراج و دامنه امواج و برای رسیدن به بیش‌ترین بازدهی در استخراج روغن با روش فراصوت از برنامه سطح پاسخ استفاده شد. نتایج نشان داد که روش استخراج با کمک امواج فراصوت با کاهش قابل ملاحظه دما و زمان استخراج روش مناسبی برای استخراج روغن از مغز گردو و هسته انبه در مقایسه با روش سوکسله است. شرایط بهینه در روش فراصوت برای استخراج روغن با بازدهی بالا از مغز گردو، زمان 70 min، دمای 25°C و دامنه امواج 100٪ و برای هسته انبه، زمان 69 min، دمای 25°C و دامنه امواج 72٪ به‌دست آمد. بازدهی استخراج روغن با استفاده از روش فراصوت در شرایط بهینه برای مغز گردو و هسته انبه به‌ترتیب 64/52٪ و 13/86٪ به‌دست آمد که مشابه با نتایج حاصله با روش سوکسله بود. مقدار و درصد اسیدهای چرب شناسایی شده در هر دو روغن، در هر دو روش استخراج، تفاوت قابل ملاحظه‌ای را نشان نداد. لینولئیک اسید در روغن مغز گردو و اولئیک اسید در روغن هسته انبه بیش‌ترین درصد را داشتند. تحلیل آماری واریانس، اعتبار نتایج حاصل از نرم‌افزار Design-Expert را تایید کرد.

واژه‌های کلیدی: استخراج، فراصوت، روغن، مغز گردو، هسته انبه، برنامه سطح پاسخ.

1- مقدمه

گردو از درختان بومی مناطق گرمسیر تا معتدل است. مغز گردو منبع ارزشمندی از روغن‌های امگا تری است که ارزش غذایی بالایی برای سلامتی مغز و قلب دارند. امگا تری سطح LDL خون را کاهش داده و به این دلیل مصرف آن برای پیشگیری از بیماری‌های قلبی-عروقی توصیه شده است. روغن گردو همچنین حاوی ویتامین C است و خواص آنتی‌اکسیدانی دارد. میزان روغن در مغز گردو حدود 65٪ (بر پایه وزن خشک) است که این میزان با توجه به منطقه جغرافیایی و شرایط رویش و گونه آن می‌تواند متفاوت باشد [2-3].

انبه از درختان بومی مناطق گرمسیر است. میوه این درخت دارای یک هسته مرکزی بزرگ زرد رنگ حاوی ویتامین‌ها، آمینواسیدها، کربوهیدرات‌ها، ترکیبات معدنی، فیبر و روغن است. هسته میوه انبه به‌طور تقریبی حاوی 13 تا 15٪ (بر پایه وزن خشک) روغن است. روغن هسته انبه خاصیت آنتی‌اکسیدانی بالایی دارد و به‌همین علت می‌توان از آن به‌عنوان یک آنتی‌اکسیدان طبیعی در غذاها استفاده کرد. درصد بالایی از اسیدهای چرب موجود در روغن انبه از نوع اشباع هستند و پایداری بالایی در برابر اکسیداسیون دارند و به این علت روغن هسته انبه، روغن مناسبی برای تهیه بیودیزل به‌شمار می‌رود. بیودیزل سوختی پاک است که از واکنش ترانس استریفیکاسیون روغن‌های گیاهی حاصل می‌شود. با توجه به محدود بودن سوخت‌های فسیلی و آلودگی‌های فراوان حاصل از احتراق آن‌ها، بیودیزل به‌عنوان سوختی پاک و تجدیدپذیر در جهت داشتن هوایی پاک و قطع وابستگی کشورها به واردات سوخت‌های فسیلی بسیار مطرح است و در نتیجه کشت گونه‌های دانه‌های روغنی به خصوص با ارزش غذایی کم‌تر در جهت تامین روغن مورد نیاز برای تهیه بیودیزل از مسائل مطرح در کشورها است که هسته میوه انبه می‌تواند یکی از این منابع باشد [4-5]. بیش‌ترین سطح زیر کشت انبه در ایران به استان هرمزگان اختصاص دارد.

در مطالعه حاضر استخراج روغن از مغز گردو و هسته میوه انبه با کمک امواج فراصوت مورد بررسی قرار گرفت و با روش سوکسله مقایسه شد. برای بهینه‌سازی شرایط استخراج در روش فراصوت با روش سطح پاسخ از نرم افزار Design-Expert 7.0.0 (Stat-Ease, Inc) استفاده شد.

روغن‌های گیاهی به‌عنوان ترکیبات ارزشمند طبیعی کاربردهای متفاوتی را در صنایع غذایی، دارویی، آرایشی و بهداشتی تا کاربردهای صنعتی مانند استفاده به‌عنوان روانکار و یا مواد اولیه پایا و پاک برای تهیه سوخت دارند. صرفه اقتصادی و کیفیت، از عوامل اثرگذار در کاربرد روغن‌های گیاهی در زمینه‌های مختلف به‌شمار می‌آید. اصلی‌ترین منابع روغن‌های گیاهی، دانه‌های روغنی مانند سویا، آفتاب گردان، کلزا، ذرت، پنبه دانه، بادام زمینی و همین‌طور برخی از میوه‌های درختی و هسته آن‌ها مانند پالم و زیتون است. تری‌گلیسریدها به‌عنوان ترکیبات اصلی روغن‌های گیاهی، مولکول‌هایی متشکل از یک گلیسرول و سه اسید چرب متصل شده به آن از طریق پیوندهای استری می‌باشند. اسیدهای چرب در تری‌گلیسریدها دارای تعداد متنوعی کربن هستند. این اسیدها ممکن است از انواع اشباع و یا غیراشباع باشند. روش‌های متنوع و متداولی برای استخراج روغن از دانه‌های روغنی (مانند استخراج با حلال توسط روش‌هایی مانند سوکسله و یا روش‌های مکانیکی مانند فشردن) وجود دارد، اما حدود یک دهه است که توجه بسیاری به استفاده از روش‌های نوین برای استخراج روغن از دانه‌های روغنی شده است. در این روش‌ها سعی شده فرایند استخراج با سهولت و اثر بخشی بیش‌تر به گونه‌ای انجام شود که مصرف حلال، زمان و دمای استخراج کاهش و در عین حال بازدهی استخراج افزایش یابد و فرایند به لحاظ هزینه به‌صرفه شود. استفاده از امواج فراصوت از جمله این روش‌ها است. در این روش از انتشار امواج فراصوت در حلال حاوی دانه‌های روغنی برای سهولت فرایند استخراج استفاده می‌شود. با انتشار امواج فراصوت در محلول پدیده حباب‌سازی اتفاق می‌افتد. ضربه ناشی از ترکیدن حباب‌ها در سطح سلول، سبب شکسته شدن دیواره سلولی و خروج سریع و آسان مواد مؤثره از سلول به داخل حلال می‌شود [1]. در روش‌هایی مانند سوکسله، فرایند استخراج بر اساس پدیده نفوذ و انتشار انجام می‌شود، به این معنی که حلال از طریق منافذ سلول‌های گیاهی وارد آن می‌شود و پس از حل کردن ترکیبات قابل انحلال دوباره در اثر پدیده اسمز از منافذ سلول به داخل حلال وارد می‌شود که این فرایندی زمان بر است.

2- مواد و روش‌ها**2-1- مواد**

مواد مورد استفاده در این مطالعه مغز گردو (*Juglans regia L.*) تهیه شده از فروشگاه محلی و میوه تازه انبه (*L. Mangifera indica*) از هرمزگان بود. مغز گردو و هسته میوه انبه، به مدت سه روز در زیر نور غیرمستقیم آفتاب خشک شدند و سپس توسط یک آسیاب خانگی پودر (با اندازه ذرات 0/5-1 mm) و در زیپ کیپ در یخچال نگهداری شدند. هگزان (فلوکای هند، خلوص 97% ≥) برای استخراج استفاده شد.

2-2- تجهیزات و روش‌ها

برای استخراج به روش سوکسله از یک دستگاه سوکسله کلاسیک با حجم 100 ml و برای استخراج با روش فراصوت از یک دستگاه اولتراسوند مدل UP 200H از شرکت dr.Hielscher GmbH آلمان با توان ثابت 200 W و فرکانس ثابت 24 kHz استفاده شد. بزرگی دامنه امواج و سیکل انتشار امواج فراصوت در این دستگاه قابل تنظیم است. فرایند استخراج با این دستگاه به صورت انتشار پیوسته امواج (سیکل 1) انجام شد. در استخراج با روش سوکسله، 30 گرم از نمونه در یک کاغذ صافی (واتمن شماره 1) در سوکسله قرار گرفت و با 150 ml هگزان به مدت 6 ساعت و در دمای جوش هگزان، استخراج انجام شد. انتخاب شرایط استخراج با روش سوکسله بر اساس بررسی‌های اولیه صورت گرفت. تکرارپذیری نتایج در استخراج با روش سوکسله با تکرار آزمایش به تعداد سه بار تأیید شد.

بعد از فرایند استخراج برای جداسازی حلال از روغن از روتاری (BUCHI Rotavapor R-114) در دمای 60 °C، فشار 500 mbar و به مدت یک ساعت استفاده شد. بازدهی استخراج به صورت وزنی (مقدار گرم روغن استخراج شده از 100 گرم نمونه خشک) از طریق معادله (1) به دست آمد. در این معادله OEY% درصد استخراج روغن، C_1 وزن روغن استخراج شده و C_0 وزن نمونه خشک اولیه است. برای اندازه‌گیری وزن از ترازوی دیجیتال (METTLER PM 600) با دقت 0/01 g استفاده شد.

$$OEY\% = \frac{C_1}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

استخراج با امواج فراصوت در یک ظرف شیشه‌ای دو جداره مجهز به کندانسور با 3 g از نمونه و 50 ml هگزان انجام شد [6-7]. دمای محلول در طی استخراج با جریان آب از یک حمام مجهز به ترموستات با دقت 1 °C ±، در جداره ظرف شیشه‌ای استخراج کنترل می‌شد. مراحل جداسازی حلال از روغن و روش اندازه‌گیری بازدهی در هر دو روش استخراج یکسان بود.

شناسایی کمی و کیفی اسیدهای چرب در روغن استخراج شده (بعد از ساخت مشتق متیل استر روغن از طریق واکنش با محلول متانولی پتاسیوم هیدروکسید) توسط آنالیز GC-FID انجام شد. این آنالیز توسط یک دستگاه گاز کروماتوگرافی (Young Lin 6100, Anyang, Korea) مجهز به دتکتور یونیزاسیون شعله‌ای و ستون موئین HP-Innowax (100/0 × 0/25 mm × 0/25 μm) (Thomas Scientific, Swedesboro, NJ) انجام شد. جزئیات دیگر در ارتباط با این آنالیز مطابق با رفرنس [7] بود.

2-3- طراحی آزمایش

برای طراحی آزمایش‌ها در استخراج با امواج فراصوت از طرح مرکزی مرکب با 3 متغیر (زمان و دمای استخراج و دامنه امواج فراصوت) و یک پاسخ (بازدهی استخراج) و معادله رگرسیون درجه 2 (معادله 2) استفاده شد.

(2)

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{i=n} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{i=n} \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=n} \beta_{ij} x_i x_j$$

در این معادله β_0 ضریب ثابت، β_i ضریب رگرسیون خطی، β_{ii} ضریب رگرسیون درجه 2، β_{ij} ضریب رگرسیون ترکیبی است. x_i و x_j متغیرهای مستقل و Y متغیر وابسته است.

محدوده تعریف شده برای متغیر زمان، دمای استخراج و دامنه امواج فراصوت به ترتیب 10-90 min، 10-65 °C و 10-100% و در سه سطح در نظر گرفته شد. در خروجی این طراحی، تعداد 17 آزمایش تعیین و انجام شد. مقادیر واقعی و کد شده متغیرهای مستقل و سطوح آن‌ها در جدول (1) و آزمایش‌های طراحی شده و نتایج آن‌ها در جدول (2) آورده شده است.

جدول (1) متغیرهای مستقل و مقادیر واقعی و کد شده آن‌ها

سطوح متغیر					نماد ریاضی	متغیر مستقل
2	1	0	-1	-2		
90/00	63/33	50/00	36/67	10/00	A	زمان (min)
65/00	51/67	45/00	38/33	25/00	B	دما (°C)
100/00	70/00	55/00	40/00	10/00	C	دامنه امواج (%)

جدول (2) آزمایش‌های طراحی شده و نتایج حاصل از آن‌ها

بازدهی استخراج روغن (%)	C	B	A	آزمایش‌های نمونه انبه	بازدهی استخراج روغن (%)	C	B	A	آزمایش‌های نمونه گردو
11	0	0	0	1	43/2	0	0	0	1
9/1	1	1	-1	2	63/27	1	1	1	2
3/4	0	0	-2	3	45	0	0	0	3
11/7	2	0	0	4	15/01	-2	0	0	4
10/9	0	2	0	5	50/14	0	2	0	5
12/4	1	-1	1	6	45/11	-1	1	1	6
10/6	0	0	0	7	22/15	-1	-1	-1	7
12/4	1	1	1	8	10/32	0	0	-2	8
10/1	-1	-1	1	9	65/73	2	0	0	9
8/5	-1	1	-1	10	60/05	1	-1	1	10
10/6	-1	1	1	11	62/3	0	0	2	11
6/2	-1	-1	-1	12	41/03	0	-2	0	12
9/3	-2	0	0	13	47/73	1	-1	-1	13
12/4	0	0	2	14	51/28	1	1	-1	14
10/5	0	0	0	15	25/53	-1	1	-1	15
9/6	1	-1	-1	16	44/95	0	0	0	16
10/1	0	-2	0	17	43/01	-1	-1	1	17

3- نتایج و بحث

ضرایب رگرسیون خطی، درجه دو و تأثیر متقابل متغیرها

در این معادلات از تحلیل آماری واریانس بر روی نتایج حاصل از آزمایش‌های طراحی شده به دست آمد. در این معادلات، A، B، C و OEY% به ترتیب نماد زمان، دما، دامنه امواج و درصد بازدهی استخراج است. سطح اطمینان برای معنی‌دار بودن ضرایب رگرسیون، 95% در نظر گرفته شد.

در جدول (3) تحلیل آماری واریانس بر نتایج آزمایش‌های طراحی شده توسط نرم افزار برای نمونه گردو و انبه آورده شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود،

تحلیل آماری واریانس (ANOVA) بر نتایج آزمایش‌ها (جدول 2)، معادله شماره (3) و (4) را به ترتیب برای گردو و انبه حاصل کرد.

$$OEY\% = 45.60 + 8.49A + 1.52B + 9.18C - 0.20AB - 2.02AC + 0.16BC - 1.00A^2 + 0.032B^2 - 0.55C^2 \quad (3)$$

$$OEY\% = +10.33 + 1.50A + 0.18B + 0.59C - 0.16AB + 0.013AC - 0.41BC - 0.28A^2 + 8.377E - 0.003B^2 + 8.377E - 0.003C^2 \quad (4)$$

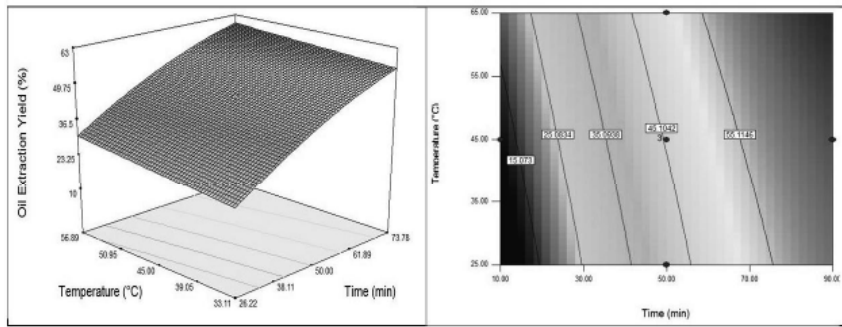
در مورد هسته انبه، ضریب رگرسیون خطی به‌دست آمده در مدل رگرسیون درجه 2، برای متغیر زمان استخراج و دامنه امواج نشان دهنده تأثیر بالای این دو متغیر بر درصد بازدهی استخراج روغن است. در حالی که با توجه به مقدار کم ضریب رگرسیون خطی متغیر دمای استخراج، تأثیر این متغیر بر بازدهی استخراج معنی‌دار نیست. همان‌طور که در شکل‌های 4 تا 6 قابل مشاهده است گستره تغییرات میزان بازدهی استخراج روغن از هسته انبه با زمان استخراج و دامنه امواج نسبت به گستره تغییرات میزان بازدهی با دما بیش‌تر است. این گستره تغییرات در مورد زمان استخراج در حدود 1 تا 16٪ و در مورد دامنه امواج در حدود 1 تا 14٪ بود. ضریب رگرسیون درجه 2 متغیرها در مورد متغیر زمان معنی‌دار بود، ولی در مورد متغیر دمای استخراج و دامنه امواج معنی‌دار نبود. ضریب رگرسیون اثر متقابل متغیرها معنی‌دار نبودند.

در بهینه‌سازی شرایط استخراج، با توجه به معنی‌دار نبودن اثر متغیر دما بر بازدهی استخراج روغن توسط روش فراصوت در مورد هر دو نمونه (گردو و هسته انبه)، دمای 25 °C برای این متغیر در نرم افزار در نظر گرفته شد و مقدار متغیر زمان در گستره 10-90 min و متغیر دامنه امواج در گستره 10-100% تعریف و تحلیل نتایج برای به‌دست آوردن حداکثر

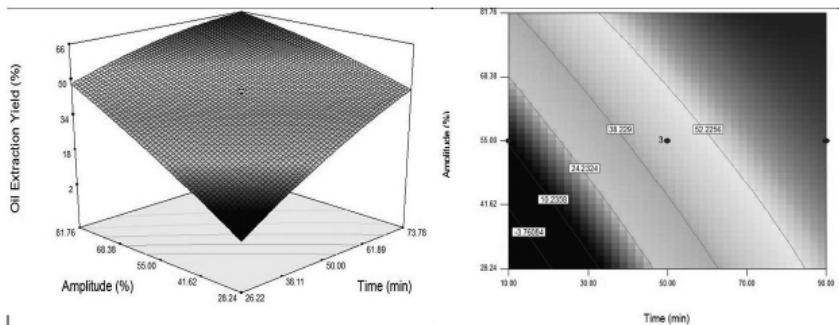
مقدار F-Value و P-Value برای مدل به‌دست آمده برای استخراج روغن از مغز گردو و هسته انبه توسط امواج فراصوت، نشان دهنده معتبر بودن مدل است. همین‌طور مقدار F-Value و P-Value به‌دست آمده برای تست عدم برازش در مورد هر دو نمونه (انبه و گردو) نشان دهنده معتبر بودن مدل برای برای پیش‌بینی اثر متغیرها بر پاسخ (درصد بازدهی استخراج روغن) است. در مورد نمونه گردو، ضریب رگرسیون خطی به‌دست آمده در مدل رگرسیون درجه 2، برای متغیر زمان استخراج و دامنه امواج نشان دهنده تأثیر بالای این دو متغیر بر درصد بازدهی استخراج روغن است. در حالی که با توجه به مقدار کم ضریب رگرسیون خطی برای متغیر دمای استخراج، تأثیر این متغیر بر بازدهی استخراج معنی‌دار نیست. همان‌طور که در شکل‌های 1 تا 3 قابل مشاهده است، گستره تغییرات میزان بازدهی استخراج روغن از مغز گردو با زمان استخراج و دامنه امواج فراصوت نسبت به گستره تغییرات میزان بازدهی با دمای استخراج به‌طور قابل توجهی بالاتر است. گستره تغییرات بازدهی استخراج با زمان استخراج و دامنه امواج در حدود 1 تا بیش‌تر از 50٪ بود در حالی که این گستره در مورد دما در حدود 10 تا 30٪ بود. ضریب رگرسیون درجه 2 متغیرها برای متغیر زمان معنی‌دار بود، ولی برای متغیر دمای استخراج و دامنه امواج معنی‌دار نبود. ضریب رگرسیون اثر متقابل متغیرها معنی‌دار نبودند.

جدول (3) نتایج حاصل از تحلیل آماری واریانس برای مدل و ضرایب رگرسیون

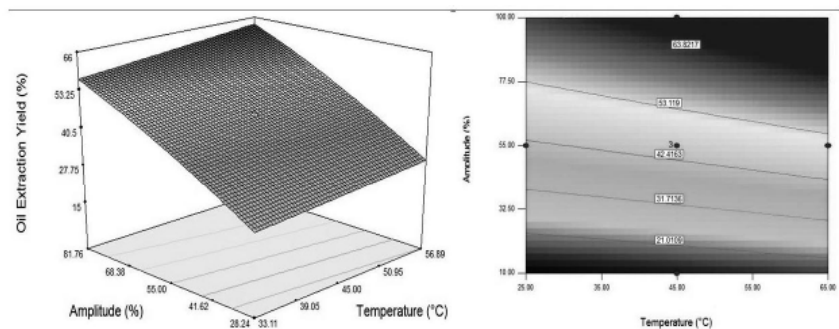
P Value	F Value	نمونه انبه	P Value	F Value	نمونه گردو
0/0006	16/50	مدل	> 0/0001	76/57	مدل
> 0/0001	108/09	A	> 0/0001	300/55	A
0/2516	1/56	B	0/0171	9/67	B
0/0048	16/55	C	0 > 0/0001	351/57	C
0/5529	0/39	AB	0/8262	0/052	AB
0/9631	2/98-E 0/003	AC	0/0563	5/22	AC
0/1577	2/50	BC	0/8602	0/033	BC
0/0053	15/87	A ²	0/0041	17/54	A ²
0/9086	0/014	B ²	0/8956	0/019	B ²
0/9086	0/014	C ²	0/0554	5/27	C ²
0/0894	10/48	عدم برازش	0/1161	7/90	عدم برازش



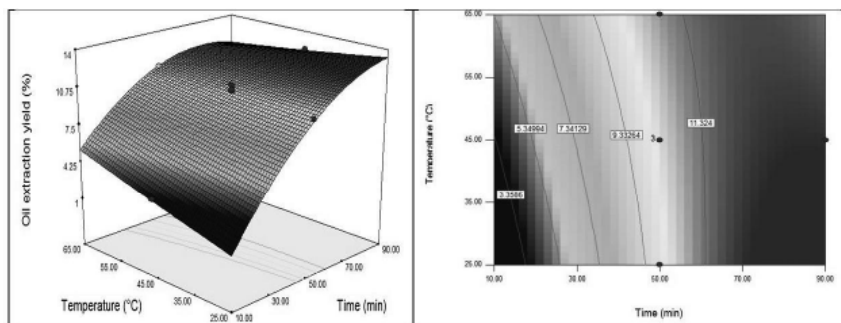
شکل (1) نمودار دو بعدی و سه بعدی اثر متقابل دما و زمان بر میزان بازدهی استخراج روغن از مغز گردو توسط امواج فراصوت در مقدار ثابت دامنه امواج فراصوت 55%



شکل (2) نمودار دو بعدی و سه بعدی اثر متقابل زمان و دامنه امواج فراصوت بر میزان بازدهی استخراج روغن از مغز گردو توسط امواج فراصوت در دمای ثابت 45°C



شکل (3) نمودار دو بعدی و سه بعدی اثر متقابل دما و دامنه امواج بر میزان بازدهی استخراج روغن از مغز گردو توسط امواج فراصوت در زمان ثابت 50 min



شکل (4) نمودار دو بعدی و سه بعدی اثر متقابل دما و زمان بر میزان بازدهی استخراج روغن از هسته انبه توسط امواج فراصوت در دامنه امواج فراصوت ثابت 55%

بازدهی توسط نرم افزار انجام شد. شرایط ذکر شده در جدول (4) به‌عنوان شرایط بهینه استخراج روغن از مغز گردو و هسته انبه توسط امواج فراصوت، توسط نرم افزار پیشنهاد شد که این نتایج توسط آزمایش تجربی تأیید شدند.

مقدار ضریب همبستگی خطی (R^2) در نمودار تطابق بین نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل و نتایج به‌دست آمده توسط آزمایش برای نمونه مغز گردو و نمونه هسته انبه به‌ترتیب 0/955 و 0/989 به‌دست آمد که نشان دهنده اعتبار بالای مدل در پیش‌بینی نتایج است (شکل‌های 7 و 8).

میزان بازدهی استخراج در شرایط بهینه در روش فراصوت با میزان بازدهی به‌دست آمده در روش سوکسله برای هر دو نمونه در جدول (5) آورده شده است. همان‌طور که نتایج در

این جدول نشان می‌دهد، میزان بازدهی استخراج به‌دست آمده توسط روش فراصوت و روش سوکسله تقریباً مشابه است. در جدول (6) اسیدهای چرب و میانگین درصد آن‌ها در روغن استخراج شده توسط هر دو روش استخراج برای هر دو نمونه آورده شده است.

4- نتیجه‌گیری

نتایج در این مطالعه نشان داد، استخراج مؤثر روغن از نمونه مغز گردو و هسته انبه با روش فراصوت در دما و زمان بسیار کم‌تری نسبت به روش سوکسله امکان‌پذیر است. میزان بازدهی استخراج روغن در روش فراصوت در شرایط بهینه برای نمونه مغز گردو (مدت زمان 70 min، دمای 25 °C و دامنه

جدول (4) نتایج بازدهی استخراج به‌دست آمده در شرایط بهینه توسط مدل و آزمایش تجربی

نمونه	زمان (min)	دما (°C)	دامنه امواج (%)	درصد بازدهی (مدل)	درصد بازدهی (تجربی)
مغز گردو	70	25	100	64/81	64/52
هسته انبه	69	25	72	14/37	13/86

جدول (5) میزان بازدهی استخراج به روش فراصوت و سوکسله

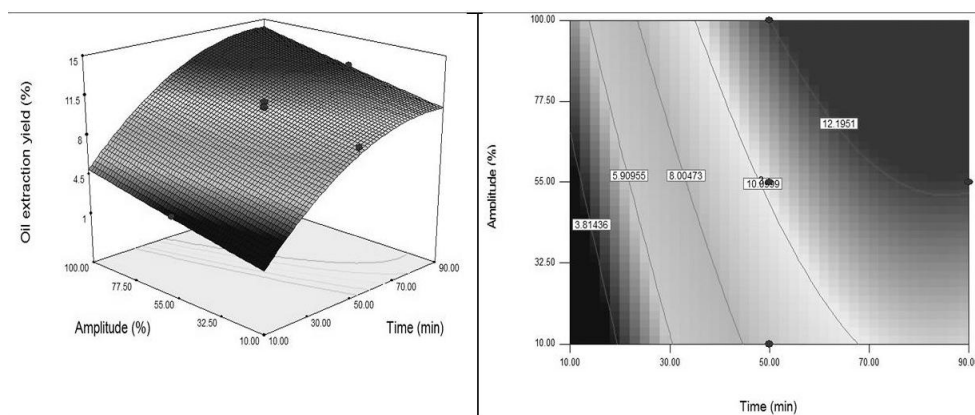
نمونه	بازدهی (%)
اولتراسوند	سوکسله
مغز گردو	64/52
هسته انبه	13/86

جدول (6) نتایج آنالیز کمی و کیفی اسیدهای چرب استخراج شده

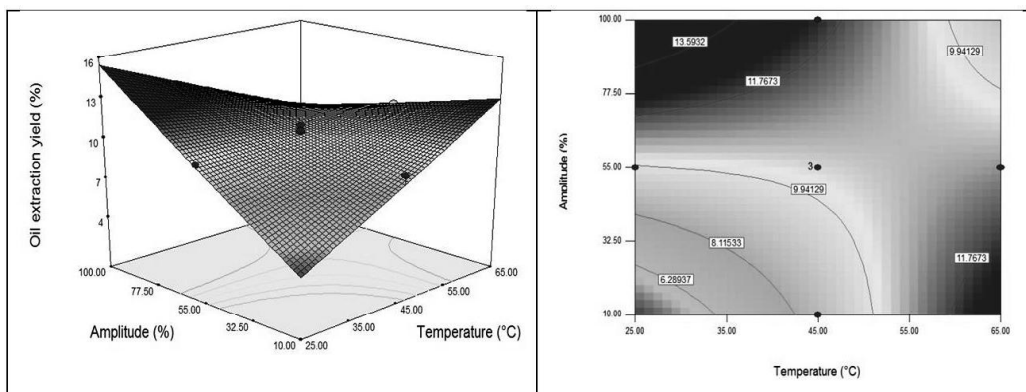
نمونه	درصد اسید چرب	نمونه	درصد اسید چرب	نمونه	درصد اسید چرب
مغز گردو	فراصوت	سوکسله	فراصوت	سوکسله	فراصوت
استتاریک	2/1	2/1	استتاریک	38/0	38/00
اولئیک	16/30	16/50	اولئیک	43/0	42/67
پالمیتیک	10/5	10/4	پالمیتیک	8/0	8/75
لینولئیک	57/11	57/3	لینولئیک	7/0	6/95
لینولئیک	12/21	12/10	لینولئیک	0/83	0/71
پالمیتولئیک	0/32	0/32	پالمیتولئیک	0/15	0/15
			ایکوزانوییک	1/97	1/84
			میریسیک	0/02	0/02

بازدهی افزایش می‌یابد. نتایج در این بررسی نشان داد دما فاکتور چندان اثرگذاری بر استخراج در این شیوه نمی‌باشد. تأثیر دما در فرایندهای معمولی استخراج به علت کاهش ویسکوزیته حلال در جهت سهولت ورود و خروج حلال از طریق منافذ سلول و همین‌طور کاهش آنتالپی انحلال ترکیبات مؤثره در حلال می‌باشد. ولی در استخراج با امواج فراصوت با توجه به متفاوت بودن مکانیسم استخراج، دما تأثیر چندان در اصل فرایند استخراج ندارد ولی هم‌چنان برای کاهش آنتالپی انحلال مؤثر است. بنابراین اگرچه در این روش نیز گرم بودن محلول در طی فرایند استخراج لازم است، ولی با توجه به این‌که پدیده حباب‌زایی در محلول، فرایندی گرمازا است، نیازی به استفاده از یک منبع حرارتی خارجی وجود ندارد و در صورت استفاده نیز تأثیر چندان را بر افزایش بازدهی ندارد که در این مطالعه این مسئله به وضوح دیده شد. طبق گزارشات علمی دما و فشار داخلی حباب‌های حاصل از پدیده کویتاسیون به ترتیب در حدود 5000°C و 2000 atm است، بنابراین با فروپاشی این حباب‌ها نقاط داغ لحظه‌ای در محلول ایجاد می‌شود که تأمین‌کننده دمای مورد نیاز در فرایند است [8-9]. بالا بودن ضریب همبستگی (R^2) در نمودار تطابق بین نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل و نتایج تجربی، نشان دهنده این است که مدل به‌دست آمده توسط برنامه Design-Expert به‌خوبی توانسته اثر متغیرها بر میزان بازدهی را بررسی نماید. نتایج این مطالعه نشان داد استفاده از این نرم افزار با کاهش تعداد آزمایش‌های لازم برای تعیین شرایط بهینه استخراج می‌تواند سبب کاهش زمان و هزینه‌های مطالعاتی شود.

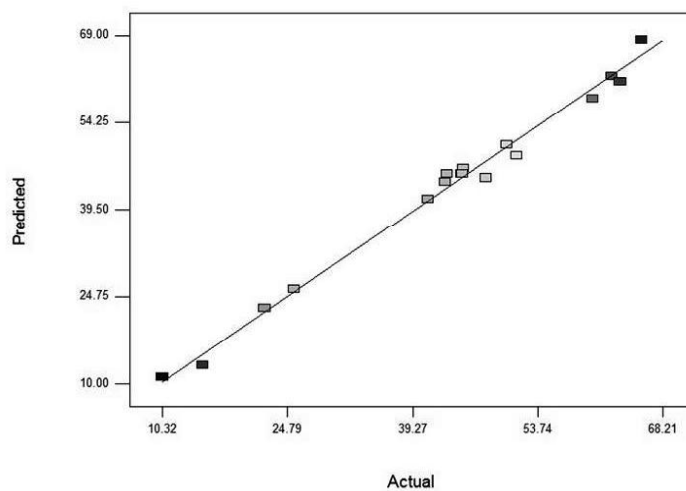
امواج 72% ($13/86\%$) به‌دست آمد که به‌طور تقریبی مشابه نتایج حاصل از روش سوکسله بود. از میان سه متغیر بررسی شده در استخراج با امواج فراصوت، زمان استخراج و دامنه امواج بیش‌ترین و دما کم‌ترین تأثیر را بر میزان بازدهی داشت. این مسئله با توجه به مکانیسم امواج فراصوت در سرعت بخشیدن به فرایند استخراج به‌خوبی قابل توضیح و توجیه است. در این روش، شکسته شدن دیواره سلولی در اثر ضربه ناشی از ترکیدن حباب‌ها بر روی سطح سلول و همین‌طور در اثر برخورد امواج ضربتی حاصل از انتشار امواج فراصوت در محلول سبب می‌شود محتویات داخلی سلول به راحتی به داخل حلال وارد شوند و اجزاء قابل انحلال با توجه به قطبیت آن‌ها در حلال حل شوند. اتفاق دیگری که در این روش سبب سرعت و بهبود فرایند استخراج می‌شود این است که با ترکیدن حباب بر سطح ذرات گیاهی، خروج جریان پر فشار فاز بخار از داخل حباب به سمت محلول مانند یک موج فشار یا به عبارتی به صورت یک میکرو پمپ عمل می‌کند و باعث حرکت و فوران پرسرعت حلال از داخل محلول به سطح ذرات گیاهی می‌شود که این فرایند نیز می‌تواند سبب تخریب دیواره سلولی و همین‌طور سبب افزایش نفوذ حلال به داخل بافت گیاهی شود. همان‌طور که نتایج در این مطالعه نشان داد در این روش افزایش دامنه امواج فراصوت باعث افزایش سرعت و بازدهی استخراج در نتیجه افزایش حباب‌سازی می‌شود [8]. نتایج در این مطالعه نشان داد که زمان استخراج فاکتور بسیار اثر گذاری بر افزایش بازدهی در این روش است، زیرا با افزایش زمان، تعداد سلول‌های بیش‌تری از نمونه در اثر انتشار امواج فراصوت، دچار تخریب دیواره سلولی می‌شوند و به این ترتیب



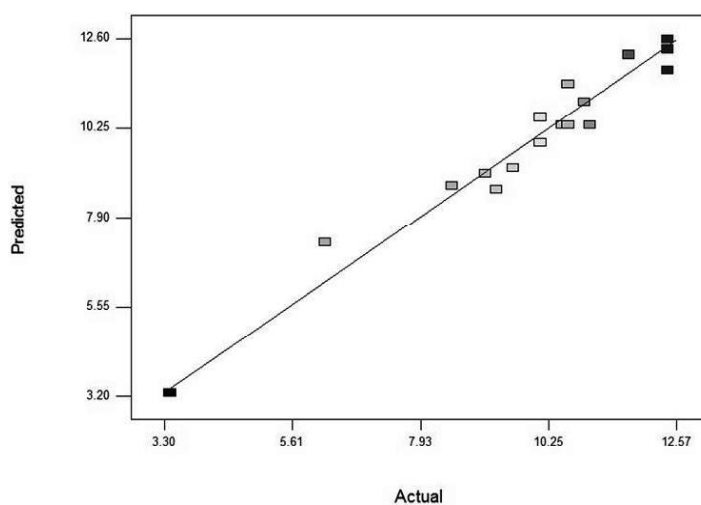
شکل (5) نمودار دو بعدی و سه بعدی اثر متقابل زمان و دامنه امواج بر میزان بازدهی استخراج روغن از هسته انبه توسط امواج فراصوت در دمای ثابت 45°C



شکل (6) نمودار دو بعدی و سه بعدی اثر متقابل دامنه امواج و دما بر میزان بازدهی استخراج روغن از هسته انبه توسط امواج فراصوت در زمان ثابت 50 min



شکل (7) نمودار تطابق نتایج حاصل از مدل و آزمایش‌های تجربی برای نمونه مغز گردو



شکل (8) نمودار تطابق نتایج حاصل از مدل و آزمایش‌های تجربی برای نمونه هسته انبه

- [1] Li, H., Pordesimo, L., Weiss, J. (2004). High intensity ultrasound-assisted extraction of oil from soy beans. *J. Food Res.*, 37, 731-738.
- [2] Rockland, L.B., Benedict, C.D. (1970). Occurrence of Fatty Acid Methyl Esters in Walnut Kernel and Other Oils. *J. Agri. Food Chem.*, 18, 228-233.
- [3] Dogan, M., Akgu, A. (2005). Fatty acid composition of some walnut (*Juglans regia* L.) cultivars from east Anatolia. *J. Grasas Aceites.*, 56, 328-331.
- [4] Kittiphoom, S., Sutasinee, S. (2013). Mango seed kernel oil and its physicochemical properties. *J. Food Res.*, 20, 1145-1149.
- [5] Nzikou, J.M., Kimbonguila, A., Matos, L., Loumouamou, B., Pambou-Tobi, N.P.G. and et al. (2010) Extraction and characteristics of seed kernel oil from mango (*Mangifera indica*). *J. Environ. Earth Sci.*, 2, 31-35.
- [6] ZHAO, S., KWOK, K.C., LIANG, H. (2007) Investigation on ultrasound assisted extraction of saikosaponins from *Radix Bupleuri*. *J. Sep. Purif. Technol.*, 55, 307-312.
- [7] Shalmashi, A. (2009). Ultrasound-assisted extraction of oil from tea seeds. *J. Food Lipids*, 16, 465-475.
- [8] Brujan, E.A. (2004). The role of cavitations micro jets in the therapeutic applications of ultrasound. *J. Ultrasound Med. Bio.*, 30, 381-387.
- [9] Javier, R., Pilar, M., Rafael, P., Francisco, J.S. (1999). Influence of different factors on the output power transferred into medium by ultrasound. *J. Ultrasonics Sonchem.*, 5, 157-162.