

بررسی انتقال جرم طی آبیگری اسمزی به کمک فراصوت ورقه‌های انبه و بهینه‌سازی با روش سطح پاسخ

صادق ریگی^۱، عنایت‌الله نقوی^{۲*}

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سبزوار

۲- باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۴/۰۷/۱۹ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۴/۰۱)

چکیده

هدف از پژوهش حاضر، بررسی اثر متغیرهای مستقل آبیگری اسمزی دما (۳۰، ۴۰، ۵۰ درجه سانتی‌گراد) و غلظت محلول اسمزی (۶۰، ۵۰، ۴۰٪ وزنی/وزنی)، نسبت محلول به نمونه (۱:۴، ۱:۶، ۱:۸؛ وزنی/وزنی) و زمان بکارگیری فراصوت (۰، ۱۰، ۲۰ دقیقه) بر آهنگ انتقال جرم طی آبیگری اسمزی به کمک فراصوت نمونه‌های انبه بود. علاوه بر این، بهینه‌سازی پارامترهای انتقال جرم برای به حداکثر رساندن از دست دادن آب (WL) و کاهش وزن (WR) و به حداقل رساندن جذب ماده جامد (SG) انجام شد. طرح مرکب مرکزی در روش سطح پاسخ (RSM) برای بهینه‌سازی آماری مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که تمام متغیرهای مستقل فرایند، تأثیر معنی‌دار بر پارامترهای انتقال جرم داشتند. با افزایش غلظت محلول اسمزی و زمان فراصوت، WL و WR افزایش یافت. همچنین، نتایج آنالیز واریانس نشان داد که مدل برازش شده برای پاسخ‌های مورد ارزیابی معنی‌دار بود ($p < 0/01$). علاوه بر این، شرایط بهینه آبیگری اسمزی انبه شامل دمای محلول اسمزی ۳۸ درجه سانتی‌گراد، غلظت محلول با بریکس ۵۴/۱۸، نسبت وزنی محلول اسمزی به نمونه ۱:۷/۴۰ و زمان فراصوت ۲۰ دقیقه بود. تحت این شرایط، مقادیر به دست آمده برای پاسخ‌های WL، SG و WR به ترتیب ۴۶/۴۸٪، ۷/۸۱٪ و ۳۸/۶۷٪ بود. بنابراین، در مجموع می‌توان نتیجه‌گیری نمود که آبیگری اسمزی به کمک فراصوت می‌تواند یک روش مؤثر برای افزایش WL طی فرایند باشد که به نوبه خود می‌تواند زمان کلی فرایند برای میوه آبیگری اسمزی - خشک شده را کاهش دهد.

کلید واژگان: آبیگری اسمزی، انبه، انتقال جرم، بهینه‌سازی، فراصوت

* مسئول مکاتبات: Enayat.naghavi@gmail.com

۱- مقدمه

انبه از مهم‌ترین میوه‌هایی است که در مناطق استوایی و نیمه-استوایی کشت می‌شود. منشاء این میوه آسیای شرقی به ویژه کشورهای میانمار و هند می‌باشد [۱]. علاوه بر ویژگی‌های حسی مطلوب، این میوه منبع بسیار غنی از ویتامین‌های آ، ث و پیش‌سازهای ویتامین آ می‌باشد که دارای خواص آنتی‌اکسیدانی می‌باشند [۲]. در کشور ایران، مناطق جنوبی استان سیستان و بلوچستان به دلیل شرایط اقلیمی مناسب، قابلیت کشت و پرورش این میوه در مقیاس بالا را دارد. با این حال، مانند بسیاری از میوه‌ها و سبزیجات، انبه نیز به دلیل محتوای رطوبت بالا، مدت زمان ماندگاری محدودی دارد. در نتیجه، روش‌های مورد استفاده برای افزایش ماندگاری این میوه مانند خشک‌کردن و آبیگری اسمزی بسیار مورد توجه هستند.

حذف آب به شکل‌های مختلف یکی از روش‌های نگهداری مواد غذایی است که علاوه بر مهار رشد میکروارگانیسم‌ها از وقوع طیف وسیعی از واکنش‌های شیمیایی مخرب در حضور رطوبت بالا در مواد غذایی جلوگیری می‌کند [۳]. از میان روش‌های بکار رفته برای کاهش محتوای رطوبت، آبیگری اسمزی یکی از پرکاربردترین روش‌های مورد استفاده در پژوهش‌های علمی بوده است که طی آن رطوبت موجود در بافت میوه‌ها و سبزیجات توسط غوطه‌ور نمودن آن‌ها در محلول‌های هایپرتونیک به طور نسبی و بدون تغییر فاز خارج می‌شود [۴]. این فرایند می‌تواند به عنوان پیش‌تیمار قبل از خشک‌کردن هوای داغ، خشک‌کردن انجمادی و خشک‌کردن با مایکروویو به کار گرفته شود [۳]. با وجود مزایای مختلف ذکر شده برای آبیگری اسمزی، یکی از چالش‌های استفاده از این روش، سرعت پایین فرایند به علت مقاومت غشای سلولی میوه‌ها و سبزیجات در برابر انتقال جرم (به ویژه با کاهش نیروی محرکه بعد از گذشت زمان‌های اولیه فرایند) می‌باشد. علاوه بر این، با جذب مواد جامد توسط محصول حین فرایند، یک لایه سطحی در اطراف نمونه تشکیل می‌شود که سرعت آبیگری اسمزی را کاهش می‌دهد [۵، ۶]. به همین دلیل، یافتن

راهکارهای مناسب توسط پژوهشگران جهت افزایش آهنگ انتقال جرم، همواره از جنبه‌های اصلی کاربرد این روش آبیگری بوده است. در این ارتباط، استفاده از فناوری‌های نوین مانند فراصوت قبل یا در حین آبیگری اسمزی از مواردی است که می‌تواند جهت افزایش آهنگ انتقال جرم طی فرایند بکار رود [۷].

فراصوت به امواج صوتی با فرکانس بالاتر از آستانه شنوایی انسان (۲۰ کیلوهرتز) گفته می‌شود. مکانیسم اثر امواج فراصوت در افزایش آهنگ انتقال جرم طی آبیگری اسمزی که یک سیستم مایع-جامد می‌باشد، عمدتاً به دلیل ایجاد کاویتاسیون یا حفره‌زایی می‌باشد. حفره‌زایی شامل تشکیل، رشد و متلاشی شدن حباب‌ها در محیط مایع می‌باشد [۸]. ترکیدن غیرمتقارن حباب‌ها در نزدیک سطح ماده غذایی منجر به انتقال جریان‌های سریع و فورانی از امواج صوتی به سطح ماده غذایی می‌شود. انقباض و انبساط‌های متوالی (اثر اسفنجی) ایجاد شده منجر به تشکیل کانال‌های میکروسکوپی و در نتیجه، سهولت خروج آب از محصول می‌شود [۹]. در سال‌های اخیر، تأثیر مثبت فراصوت بر بهبود انتقال جرم طی آبیگری اسمزی محصولات مختلف گزارش شده است [۸، ۱۰-۱۲]. همزمان با بکارگیری روش‌های نوین مانند فراصوت، پژوهش‌های مختلف انجام شده در ارتباط با آبیگری اسمزی و بررسی سینتیک تغییرات انتقال جرم نشان داده‌اند که پارامترهایی نظیر دما و غلظت محلول اسمزی، زمان آبیگری، شکل و اندازه ماده غذایی، نسبت محلول اسمزی به نمونه و میزان تحرک محلول اسمزی تأثیر قابل توجهی بر انتقال جرم طی آبیگری اسمزی دارند [۶].

در پژوهشی جهت افزایش آهنگ انتقال جرم طی آبیگری اسمزی (در غلظت ثابت ۷۰٪ و محدوده دمایی ۷۰-۴۰ درجه سانتی‌گراد) سیب از تیمار فراصوت استفاده شد [۱۳]. افزایش دما تأثیر قابل توجهی بر افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت داشت. در مورد جذب ماده جامد (SG)، دما اثر معنی‌داری

بررسی اثر زمان پیش تیمار فراصوت و شرایط محلول اسمزی شامل غلظت، دما و نسبت وزنی محلول به نمونه بر پارامترهای سینتیکی انتقال جرم شامل از دست دادن آب (WL)، جذب ماده جامد (SG) و کاهش وزن (WR) میوه انبه و در نهایت، تعیین شرایط بهینه فرایند آبیگری اسمزی با استفاده از روش RSM بود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

شکر و میوه انبه (واریته پاکستانی پیوندی با محتوای رطوبت اولیه ۸۲/۳٪، بر پایه مرطوب) با درجه رسیدگی و سفتی مناسب و دارای اندازه تقریباً یکسان از بازار تهیه گردید. نمونه‌های انبه تا پایان انجام آزمایش‌ها در دمای یخچال نگهداری شدند.

۲-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها

پس از شستشوی اولیه و پوست‌گیری با یک پوست‌کن دستی، میوه‌ها به دو نیم برش داده شدند. هسته میانی جدا و توسط کاتر دستی و یک چاقوی تیز، با دقت لازم ورقه‌هایی یکسان با ضخامت ۱ سانتی‌متر از نمونه‌ها تهیه گردید و بلافاصله با فرایند آبیگری اسمزی تیمار شدند.

۲-۳- آبیگری اسمزی به کمک فراصوت^۲

برای اعمال امواج فراصوت، از یک دستگاه حمام فراصوت (مدل PS-20AD، با قابلیت تنظیم زمان، دما و فرکانس در دو سطح ۲۸ و ۴۰ کیلوهرتز) با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز استفاده شد. برای انجام آبیگری اسمزی به کمک فراصوت، در هر بار انجام آزمایش، ابتدا وزن مشخصی از برش‌های انبه (حدود ۱۰۰ گرم) در داخل یک بشر حاوی محلول اسمزی با غلظت مشخص (۶۰-۴۰٪ وزنی/وزنی) قرار داده شد. سپس، بشر حاوی نمونه و محلول اسمزی به مدت ۱۰ یا ۲۰ دقیقه در داخل حمام فراصوت قرار داده شد [۲۳ و ۲۴]. در نهایت، پس

نداشت. همچنین، هر دو پارامتر از دست دادن آب (WL) و SG در نمونه‌های آبیگری شده با فراصوت به طور معنی‌داری (به ترتیب ۲۷-۱۴٪ و ۲۳٪) نسبت به نمونه‌های شاهد بیشتر بود. همچنین، در مطالعه‌ای دیگر نشان داده شد که تخریب نسبی بافت سلولی و ایجاد تغییر در ریزساختار نمونه‌ها توسط امواج فراصوت باعث افزایش WL و SG طی آبیگری اسمزی نمونه‌های پایا شد [۸]. در پژوهشی توسط شهیدی و همکاران (۲۰۱۲) از آبیگری تلفیقی فراصوت-اسمزی موز به عنوان پیش تیمار برای خشک کردن با هوای داغ، استفاده شد [۱۱]. نتایج نشان داد که استفاده از غلظت‌های بالاتر محلول اسمزی باعث افزایش WL و SG گردید. در مورد این دو پارامتر، زمان فراصوت اثر معنی‌داری نداشت؛ اما نوع ماده به کار رفته برای تهیه محلول اسمزی (گلوکز و ساکارز) و غلظت، تأثیر معنی‌داری داشتند. در پژوهشی جدید گزارش شد که بکارگیری پیش تیمار فراصوت طی آبیگری اسمزی، منجر به افزایش WL و SG برای میوه گواوا گردید [۱۴]. نتایج مشابهی از لحاظ افزایش WL و SG طی آبیگری اسمزی نمونه‌های پیش تیمار شده با فراصوت در سایر پژوهش‌ها گزارش شده است [۱۲ و ۱۵]. علاوه بر این، با افزایش غلظت و زمان غوطه‌وری در محلول اسمزی، میزان WL و SG افزایش یافت که در تطابق با نتایج سایر پژوهشگران است [۱۶-۱۹].

روش سطح پاسخ (RSM) مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری است که قابلیت تحلیل معادلات چند پارامتری و بسط مدل‌های ریاضی پیش‌بینی‌کننده برای ارزیابی همزمان تأثیر متغیرهای مستقل بر روی متغیرهای وابسته (پاسخ‌ها) و بهینه‌سازی فرایندهای مختلف را دارد [۲۰]. در سال‌های اخیر، RSM به طور گسترده جهت بهبود و بهینه‌سازی فرایندهای مختلف در صنایع غذایی از جمله آبیگری اسمزی مورد استفاده قرار گرفته است [۴، ۱۵، ۲۱ و ۲۲]. در واقع، با استفاده از RSM می‌توان شرایط بهینه پارامترهای تأثیرگذار بر آبیگری اسمزی را تعیین و در نتیجه، کیفیت محصول و بازده فرایند آبیگری را افزایش داد. بنابراین، هدف از پژوهش حاضر

WL: از دست دادن آب (درصد، گرم به ازای ۱۰۰ گرم نمونه اولیه)

SG: جذب ماده جامد (درصد، گرم به ازای ۱۰۰ گرم نمونه اولیه)

WR: کاهش وزن (درصد، گرم به ازای ۱۰۰ گرم نمونه اولیه)

۲-۵- اندازه گیری رطوبت

محتوای رطوبت نمونه‌های تازه و آبیگری اسمزی شده طبق روش مرجع AOAC (931.04) اندازه‌گیری شد [۲۵].

۲-۶- طرح آزمایشی و آنالیز آماری

به منظور بهینه‌سازی پارامترهای انتقال جرم از روش سطح پاسخ (RSM) و طرح مرکب مرکزی^۳ با ۳۰ تیمار و ۶ تکرار در نقطه مرکزی استفاده گردید. مقادیر واقعی و کد شده متغیرهای مستقل مورد بررسی در جدول ۱ نشان داده شده است.

مدل چند جمله‌ای درجه دوم مورد استفاده برای بررسی اثرات متغیرهای مستقل بر پاسخ‌های مورد بررسی به صورت زیر بود:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i \neq j=1}^k \beta_{ij} X_i X_j$$

در معادله فوق، β_0 ، β_i ، β_{ii} و β_{ij} به ترتیب بیانگر ضرایب رگرسیون برای عرض از مبدا، اثر خطی، اثر درجه دوم و اثر متقابل

هستند. X_i و X_j متغیرهای مستقل بوده و Y نیز بیانگر پاسخ‌های مدل می‌باشد. آنالیز داده‌ها و رسم نمودارهای سطح پاسخ با استفاده از نرم‌افزار Design expert 6.0.2 انجام شد.

۳- نتایج و بحث

مقادیر پارامترهای انتقال جرم در آبیگری اسمزی برش‌های میوه انبه و ضرایب رگرسیون مدل چند جمله‌ای درجه دوم برای متغیرهای مستقل و پاسخ‌ها به ترتیب در جداول ۲ و ۳ نشان داده شده است.

از طی زمان مورد نظر، بشر حاوی نمونه از دستگاه حمام فراصوت خارج و برای انجام ادامه فرایند آبیگری اسمزی وارد یک دستگاه بن‌ماری (مدل WT8، ساخت شرکت فن‌آزما گستر با ظرفیت ۱۶ لیتر) شد که از قبل دمای آن تنظیم شده بود. این کار به منظور کنترل دمای محلول اسمزی طی فرایند انجام شد [۷]. به دلیل انتخاب متغیرهای دما، غلظت محلول اسمزی، نسبت محلول به نمونه و زمان بکارگیری فراصوت در سطوح مختلف، فرایند آبیگری در داخل بن‌ماری در زمان ثابت ۱۲۰ دقیقه انجام گردید که دلیل انتخاب این زمان، استفاده از آن در پژوهش‌های قبلی بود [۷ و ۱۵]. نسبت وزنی محلول اسمزی به نمونه‌ها، طبق طرح تعریف شده ۴:۱، ۶:۱ و ۸:۱ بود که در محدوده نسبت‌های مورد استفاده در کارهای پژوهشی قبلی است. پس از اتمام مدت زمان تعیین شده برای آبیگری اسمزی، نمونه‌ها از داخل بشر حاوی محلول اسمزی خارج و با آب مقطر شستشو داده شدند. سپس، رطوبت سطحی آن‌ها با کاغذ صافی گرفته و توزین گردیدند.

۲-۴- محاسبه پارامترهای انتقال جرم

پارامترهای انتقال جرم شامل از دست دادن آب (WL)، جذب ماده جامد (SG) و کاهش وزن (WR) با استفاده از روابط زیر محاسبه شدند [۱۴]:

$$WL = \frac{W_i X_i - W_f X_f}{W_i} \times 100$$

$$SG = \frac{W_f (1 - X_f) - W_i (1 - X_i)}{W_i} \times 100$$

$$WR = WL - SG$$

W_i : جرم اولیه نمونه (گرم)

W_f : جرم نمونه بعد از آبیگری اسمزی (گرم)

X_i : رطوبت اولیه (درصد، بر پایه مرطوب)

X_f : رطوبت نمونه بعد از آبیگری اسمزی (درصد، بر پایه مرطوب)

Table 1 Variables of central composite experimental design and coded and uncoded levels

Independent variables	Coded and uncoded levels		
	-1	0	+1
Temperature (X_1 , °C)	30	40	50
Sucrose concentration (X_2 , °Brix)	40	50	60
Solution to sample ratio (X_3 , w/w)	4:1	6:1	8:1
Ultrasound time (X_4 , min)	0	10	20

Table 2 Experimental designs and values of experimental data for the response surface analysis during osmotic dehydration of mango slices

Run	Temperature (°C)	Concentration (°Brix)	Solution to sample ratio (w/w)	Ultrasound time (X_4)	WL (%)	SG (%)	WR (%)
1	40	40	6:1	10	34.90	9.95	24.95
2	50	60	4:1	20	45.09	13.23	31.86
3	50	60	4:1	0	33.19	8.47	24.72
4	30	40	8:1	20	39.25	8.91	30.34
5	50	60	8:1	20	50.79	13.02	37.77
6	50	40	4:1	20	37.71	8.12	29.59
7	40	50	6:1	10	36.59	9.60	26.99
8	40	50	6:1	10	37.72	9.68	28.04
9	30	60	8:1	20	48.74	9.77	38.97
10	30	40	4:1	20	29.94	5.50	24.44
11	40	50	8:1	10	34.90	10.24	24.66
12	30	60	4:1	20	40.01	9.06	30.95
13	30	40	8:1	0	32.76	5.80	26.96
14	30	60	4:1	0	30.39	7.22	23.17
15	40	50	6:1	10	37.16	8.13	29.03
16	50	40	8:1	20	45.69	11.88	33.81
17	40	50	4:1	10	29.70	8.33	21.37
18	40	50	6:1	10	36.82	10.21	26.61
19	30	40	4:1	0	20.80	3.01	17.79
20	40	50	6:1	0	28.47	7.50	20.97
21	50	40	8:1	0	37.12	11.9	25.22
22	30	50	6:1	10	38.55	6.40	32.15
23	40	50	6:1	10	33.88	9.81	24.07
24	40	50	6:1	20	41.74	9.75	31.99
25	30	60	8:1	0	38.19	5.64	32.55
26	50	40	4:1	0	30.81	6.90	23.91
27	50	60	8:1	0	36.53	13.18	23.35
28	40	50	6:1	10	36.16	9.36	26.80
29	40	60	6:1	10	35.17	11.26	23.91
30	50	50	6:1	10	40.60	9.41	31.19

Table 3 Regression coefficients of different responses

Independent variables	Regression coefficients		
	WL (%)	SG (%)	WR (%)
intercept	35.76	9.35	26.41
X_1	2.16	1.93	0.23
X_2	2.73	1.05	1.68
X_3	3.68	1.14	2.55
X_4	5.04	1.09	3.95
X_1^2	4.44	-1.33	5.77
X_2^2	-0.10	1.37	-1.47
X_3^2	-2.84	0.052	-2.89
X_4^2	-0.031	-0.61	0.58
X_{12}	-1.27	0.039	-1.31
X_{13}	-0.90	0.50	-1.40
X_{14}	0.36	-0.36	0.73
X_{23}	-0.62	-0.71	0.084
X_{24}	0.95	0.24	0.72
X_{34}	0.14	-0.20	0.35

X_1 : Temperature (°C), X_2 : Solution concentration (%), X_3 : Solution to sample ratio (w/w), X_4 : Ultrasound time (min)

Table 4 ANOVA Table showing the significance of the effect of dehydration variables on each of the responses

Source	df	F value		
		WL (%)	SG (%)	WR (%)
Model	14	23.87***	14.22***	12.41***
X ₁	1	26.79***	85.42***	0.26
X ₂	1	42.72***	25.14***	13.89***
X ₃	1	77.90***	29.64***	31.91***
X ₄	1	145.67***	27.15***	76.76***
X ₁ ²	1	16.28***	5.80**	23.57***
X ₂ ²	1	0.0083	6.19**	1.54
X ₃ ²	1	6.64**	0.0881	5.91**
X ₄ ²	1	0.0769	1.22	0.24
X ₁₂	1	8.82**	0.031	7.49**
X ₁₃	1	4.17*	4.99**	8.58**
X ₁₄	1	0.68	2.64	2.30
X ₂₃	1	1.99	10.19***	0.031
X ₂₄	1	4.62**	1.13	2.24
X ₃₄	1	0.11	0.84	0.53
Residual	15	-	-	-
Lack of fit	10	2.13	1.83	1.47
Pure error	5	-	-	-
Total	29	-	-	-
R ²	-	0.9570	0.9299	0.9205
CV	-	4.83	9.82	6.93

X₁: Temperature (°C), X₂: Solution concentration (%), X₃: Solution to sample ratio (w/w), X₄: Ultrasound time (min)

***Significant at $p < 0.01$; **Significant at $p < 0.05$; *Significant at $p < 0.10$

در اثر کاهش ویسکوزیته محلول اسمزی منجر به افزایش آهنگ WL می‌شود [۵، ۲۶ و ۲۷]. تأثیر مثبت افزایش غلظت در افزایش آهنگ WL در پژوهش‌های مختلف گزارش شده است [۱۷-۱۹]. در این ارتباط، در پژوهشی در ارتباط با آبیگری اسمزی گوجه‌فرنگی گزارش شد که با افزایش غلظت محلول اسمزی، نیروی محرکه لازم برای خروج آب از نمونه به دلیل گرادیان فشار اسمزی افزایش می‌یابد [۱۶].

شکل ۱-۱ اثر فاکتورهای دما و نسبت محلول به نمونه بر WL را نشان می‌دهد. همچنان که مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت محلول به نمونه تا حدود ۷:۱ در هر دمای محلول مورد استفاده، میزان WL افزایش می‌یابد؛ اما در نسبت رو به حداکثری ۸:۱، کاهش کمی در میزان WL حاصل شد. به لحاظ اثر روی WL، نتایج نیز نشان داد که اثر خطی نسبت محلول به نمونه تأثیر مثبت ($p < 0.01$) داشت؛ اما اثر درجه دوم آن دارای تأثیر منفی ($p < 0.05$) بود. گزارش شده است در نسبت‌های پایین محلول اسمزی به نمونه، رقیق شدن سریع‌تر محلول اسمزی منجر به کاهش آهنگ WL در طول فرایند آبیگری می‌شود [۲۸]. در مقابل، علت تأثیر منفی نسبت‌های محلول به نمونه در سطوح حداکثری نیز به تجمع لایه‌های

نتایج آنالیز واریانس نشان داد که مدل برازش داده شده برای هر سه پاسخ مورد بررسی معنی‌دار بود ($p < 0.01$). مقادیر بالای ضریب تبیین به دست آمده برای هر سه پاسخ مورد بررسی ($R^2 > 0.90$) و ضریب تغییرات (CV) کمتر از ۱۰٪ برای مدل‌های برازش شده، بیانگر تطابق بسیار خوب مدل‌های رگرسیونی مورد استفاده با نقاط آزمایش شده و دقت بالای آن در پیش‌بینی مقادیر متغیرهای وابسته می‌باشد (جدول ۴).

۳-۱- از دست دادن آب (WL)

تأثیر متغیرهای مستقل دما و غلظت بر پاسخ از دست دادن آب (WL)، به صورت نمودار سطح پاسخ در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. در مورد WL، غلظت فقط تأثیر خطی مثبت داشت ($p < 0.01$)؛ اما دما دارای تأثیر مثبت خطی و درجه دوم بر میزان WL بود ($p < 0.01$) که وجود انحنای بالارونده در منحنی اثر متقابل دما-غلظت همزمان با افزایش دما نیز این امر را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱-۱، حداکثر مقدار WL نیز در مقادیر بالای دما و غلظت محلول حاصل شد. طی آبیگری اسمزی، انتشار یا خروج رطوبت وابسته به دما می‌باشد [۵]. پژوهش‌های مختلف نشان داده است که افزایش دما از طریق چروکیدگی غشای سلولی و نیز بهبود خصوصیات انتقال جرم

غلظت محلول به دست آمد و غلظت محلول نیز دارای اثر خطی بر WL بود. پس از حذف عوامل غیرمعنی دار، معادله رگرسیونی به دست آمده برای پاسخ WL بر حسب مقادیر کد شده متغیرهای مستقل به صورت زیر بود ($R^2=0/9570$):

$$Y_1 (WL, \%) = +35/76 + 2/16 X_1 + 2/73 X_2 + 3/68 X_3 + 0/04 X_4 + 6/44 X_1^2 - 2/84 X_3^2 + -1/27 X_{12} + 0/95 X_{24}$$

مقدار R^2 به دست آمده بیانگر مناسب بودن مدل مورد استفاده برای پیش بینی اثر متغیرهای مستقل بر پاسخ WL می باشد.

۲-۳- جذب ماده جامد (SG)

اثرات درجه اول دما و نسبت محلول به نمونه تأثیر مثبت بر جذب ماده جامد (SG) داشتند ($p<0/01$). اما اثر درجه دوم دما تأثیر منفی بر SG داشت ($p<0/05$).

شکر در سطح خارجی میوه نسبت داده می شود که به عنوان مانعی در برابر خروج رطوبت عمل می کند [۲۹].

شکل ۱-۱ اثر غلظت محلول اسمزی در مقابل زمان فراصوت در نقطه مرکزی دما و نسبت محلول به نمونه را نشان می دهد. با افزایش زمان فراصوت در هر غلظت محلول مورد استفاده (به ویژه در غلظت های بالاتر)، میزان WL به صورت خطی افزایش یافت که این مشاهده در تطابق با تأثیر مثبت اثر خطی فراصوت در مورد WL است ($p<0/01$). دلیل این امر را می توان به تشکیل کانال های میکروسکوپی و تخریب دیواره سلولی در اثر بکارگیری امواج فراصوت نسبت داد که منجر به تسهیل خروج رطوبت و افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت طی آبدگی اسمزی می شود [۷]. نتیجه مشابهی در آبدگی اسمزی کلم بروکلی گزارش شد [۱۲]. مطابق شکل ۱-۱، حداکثر میزان WL در حداکثر زمان فراصوت و حداکثر

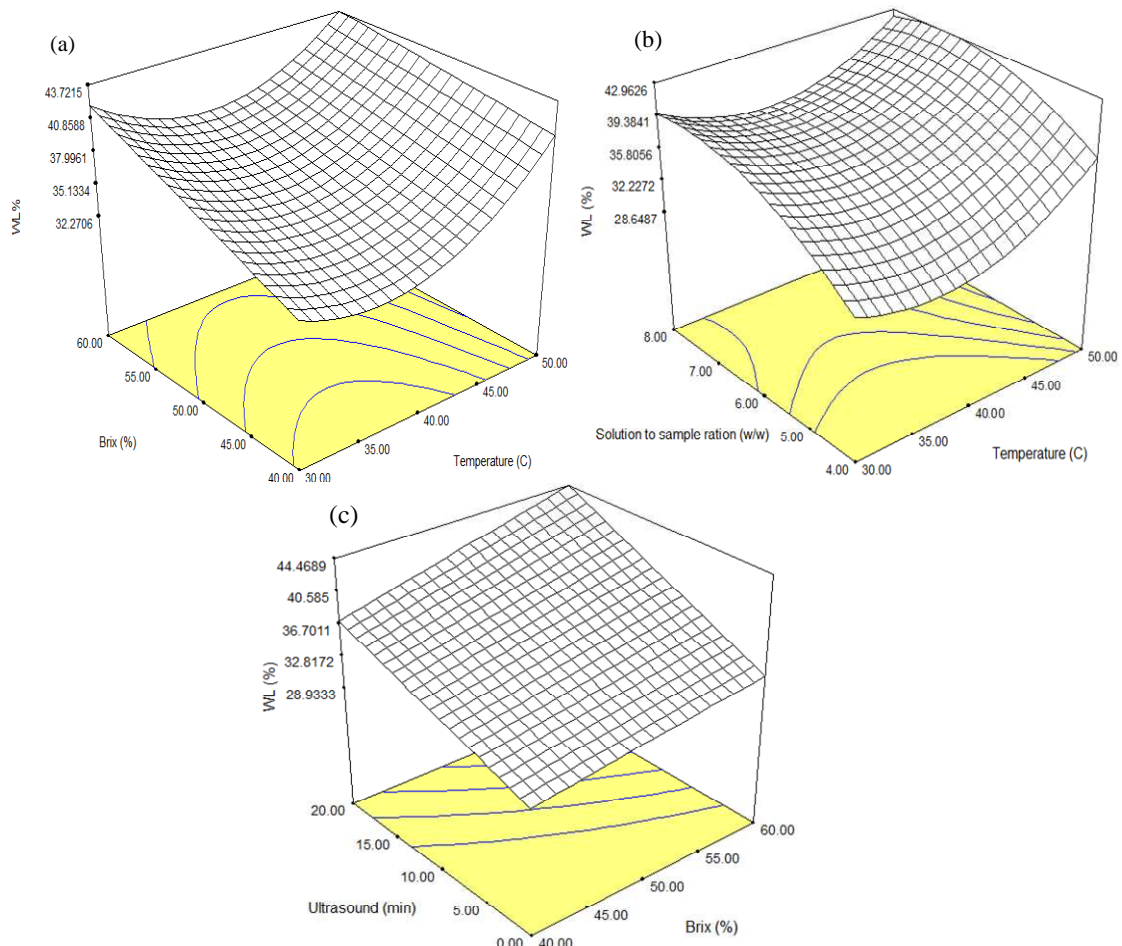


Fig 1 Response surfaces for water loss (WL) during osmotic dehydration of mango slices as function of (a) temperature (°C) and concentration (%), (b) temperature (°C) and solution to sample ratio, (c) concentration and ultrasound time (min)

حذف خاصیت انتخابی غشاء منجر به نفوذ بیشتر ماده جامد به داخل بافت انبه شود [۳۰]. در پژوهشی در ارتباط با آبدگی

پژوهش های مختلف نشان داده است که افزایش دما بر نفوذپذیری غشای سلولی تأثیر می گذارد. در نتیجه، می تواند با

واقع، تأثیر منفی حاصل شده برای اثر درجه دوم دما بیانگر کاهش SG در سطوح حداکثر دمای مورد استفاده است. دلیل این امر را می‌توان به احتمال زیاد به تخریب بیشتر دیواره سلولی در دماهای بالاتر و خروج مواد جامد از بافت انبه به محیط اسمز نسبت داد. حداکثر مقدار SG نیز در مقادیر بالای نسبت محلول به نمونه (حدود ۷/۵) و مقادیر متوسط به بالای دما (حدود ۴۵ درجه سانتی‌گراد) به دست آمد.

شکل ۲-ب تأثیر همزمان سطوح مختلف غلظت محلول و نسبت محلول به نمونه بر SG را نشان می‌دهد. با افزایش غلظت محلول در هر نسبت محلول به نمونه مورد استفاده، میزان SG افزایش یافت و حداکثر مقدار آن در مقادیر حداکثر غلظت محلول به دست آمد.

اسمزی گیلای هندی گزارش شد که نسبت‌های بالاتر محلول اسمزی به نمونه، میزان SG را به دلیل جلوگیری از رقیق شدن محلول اسمزی طی فرایند آبیگری اسمزی افزایش داد [۲۹].

اثرات سطوح مختلف دما و نسبت وزنی محلول به نمونه بر SG در شکل ۲-ا نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش دمای محلول در هر نسبت محلول به نمونه مورد استفاده، میزان SG افزایش می‌یابد و حداکثر این اثر، در مقادیر بالای نسبت محلول به نمونه مشاهده می‌شود و همچنین این اثر در محدوده نسبت محلول به نمونه مورد آزمون، خطی است. همچنین، با افزایش همزمان نسبت محلول به نمونه و دمای محلول، میزان SG ابتدا افزایش یافته و به تدریج در دماهای بالاتر آهنگ آن کاهش می‌یابد. در

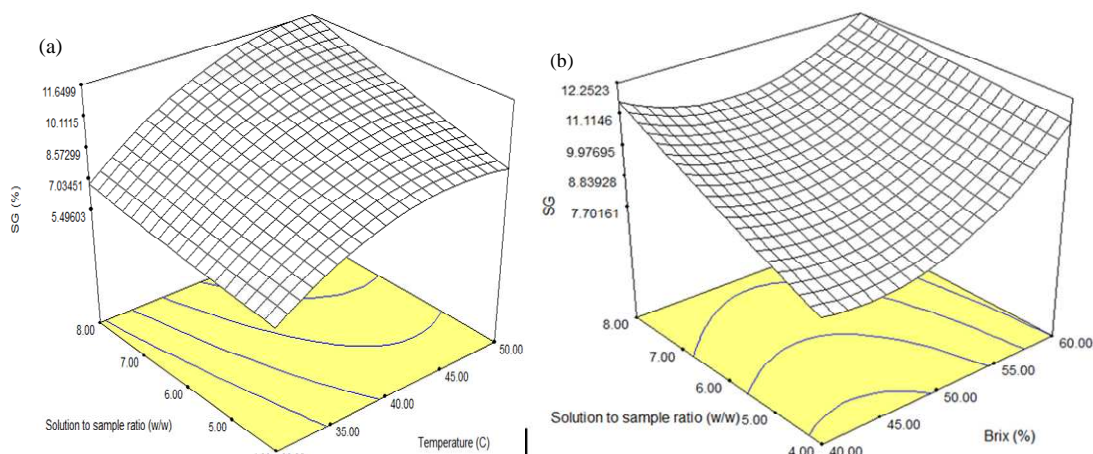


Fig 2 Response surfaces for solid gain (SG) during osmotic dehydration of mango slices as function of (a) temperature ($^{\circ}\text{C}$) and solution to sample ratio, and (b) concentration (%) and solution to sample ratio

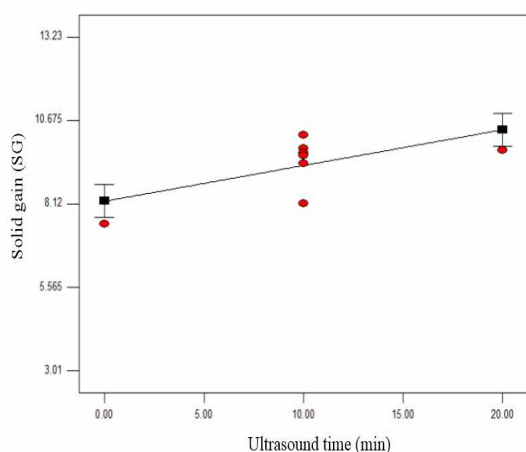


Fig 3 Effect of ultrasound time (min) on the solid gain (SG)

در غلظت‌های بالاتر، اختلاف غلظت بیشتر بین نمونه‌ها و محلول اسمزی نیروی محرکه لازم برای افزایش SG می‌باشد. مطابق نتایج به دست آمده، اثرات درجه اول غلظت و نسبت محلول به نمونه ($p < 0.01$) و اثر درجه دوم غلظت ($p < 0.05$) تأثیر مثبت بر جذب ماده جامد داشتند که این اثرات در شکل ۲-ب قابل مشاهده است.

در پژوهش حاضر، تأثیر زمان فراصوت بر SG تنها در حالت اثر خطی مثبت و معنی‌دار بود ($p < 0.01$, جدول ۴ و شکل ۳).

مقدار R^2 به دست آمده نشان می‌دهد که مدل بکار رفته برای پیش‌بینی اثر متغیرهای مستقل بر پاسخ WL مناسب است.

۳-۳- کاهش وزن (WR)

در مورد متغیر مستقل کاهش وزن (WR)، جملات درجه اول غلظت و نسبت محلول به نمونه تأثیر مثبت بر WR نمونه‌های انبه داشتند ($p < 0.01$)؛ اما اثر درجه دوم غلظت معنی‌دار نبود ($p > 0.05$).

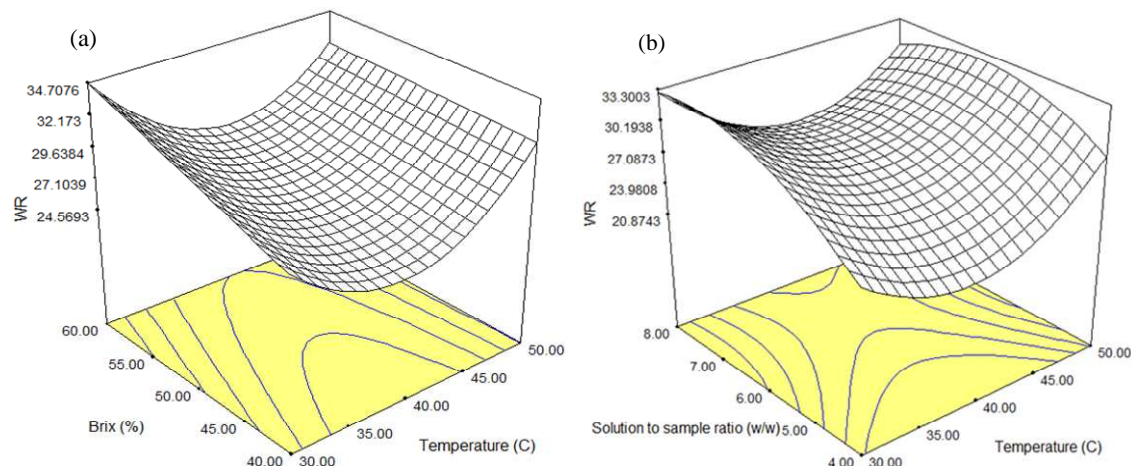


Fig 4 Response surfaces for weight reduction (WR) during osmotic dehydration of mango slices as function of (a) temperature (°C) and concentration (%), and (b) temperature (°C) and solution to sample ratio

نسبت‌های محلول به نمونه بالا قابل انتظار می‌باشد (شکل ۴-ب).

مطابق نتایج به دست آمده، اثر خطی (مستقل) فراصوت نیز تأثیر مثبتی بر WR داشت ($p < 0.01$)؛ به طوری که با افزایش زمان فراصوت، میزان WR به طور خطی افزایش یافت (شکل ۵).

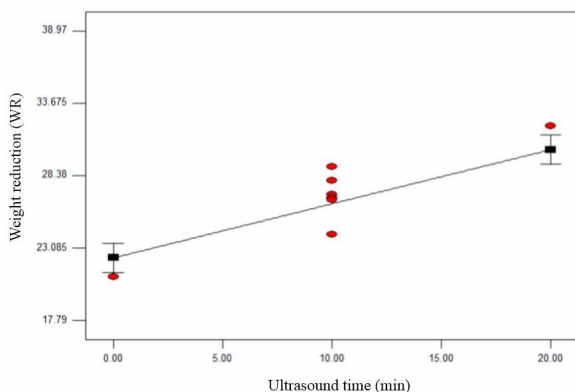


Fig 5 Effect of ultrasound time (min) on the weight reduction (WR)

اثر فراصوت بر WR با توجه به موارد بیان شده در مورد اثر آن بر WL و SG قابل توجیه است. مختاریان و همکاران (۱۳۹۱) نیز تأثیر مثبت فراصوت بر WR را طی آبیگری ترب

نتایج یک پژوهش نیز نشان داد که بکارگیری فراصوت با تغییر در روزه‌های ساختار سلولی در نمونه، منجر به افزایش WL و SG در آبیگری اسمزی پایا شد [۸]. ارتباط بین پاسخ SG و متغیرهای مستقل بر حسب معادله رگرسیونی به دست آمده به صورت زیر بود ($R^2 = 0.9299$):

$$Y_7 (SG, \%) = + 9.35 + 1/93 X_1 + 1/05 X_2 + 1/14 X_3 + 1/09 X_4 - 1/33 X_1^2 + 1/37 X_2^2 + 0/50 X_{13} - 0/71 X_{23}$$

همچنین، اثر درجه دوم نسبت محلول به نمونه اثر منفی بر WR داشت ($p < 0.05$). شکل ۴-ا تأثیر همزمان سطوح مختلف دما و غلظت محلول بر پاسخ WR را نشان می‌دهد. با افزایش غلظت محلول در دماهای پایین، میزان WR به صورت خطی افزایش یافت. همچنین، افزایش دما در مقادیر پایین منجر به کاهش WR شد و سپس افزایش دما به صورت درجه دوم WR را افزایش داد. در واقع، اگرچه جمله خطی دما اثر معنی‌داری بر WR نداشت ($p > 0.05$)؛ با این حال تأثیر مثبت جمله درجه دوم دما بر کاهش وزن ($p < 0.01$) بیانگر افزایش WR در دماهای بالاتر می‌باشد. گنجلو و همکاران (۲۰۱۴) در آبیگری اسمزی گواوا نتیجه مشابهی را گزارش کردند [۲۱]. افزایش دما از طریق چروکیدگی غشای سلولی و کاهش ویسکوزیته محلول اسمزی (در نتیجه بهبود انتقال جرم) می‌تواند منجر به افزایش WR شود [۵، ۲۶ و ۲۷].

مطابق شکل ۴-ب، دما دارای تأثیر درجه دوم بر WR است و با افزایش میزان نسبت محلول به نمونه، مقدار WR ابتدا افزایش یافته و سپس به تدریج کاهش می‌یابد. بنابراین، با توجه به تأثیر منفی افزایش بیش از حد نسبت محلول به نمونه بر WR، کاهش وزن کمتر طی فرایند آبیگری اسمزی انبه در

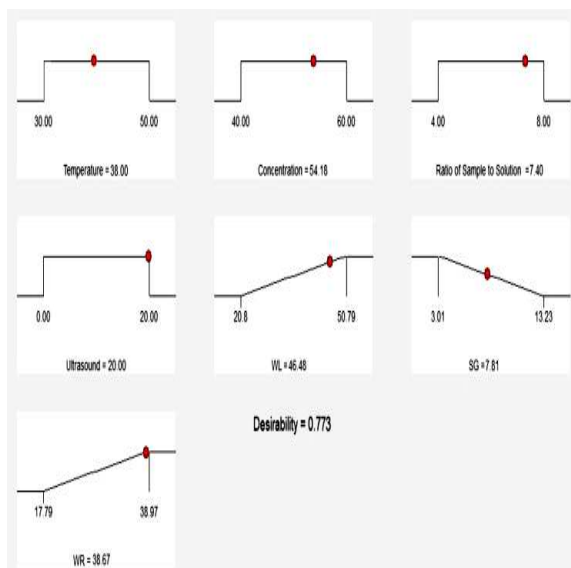


Fig 6 Optimum conditions for responses during osmotic dehydration of mango slices

۴- نتیجه گیری

در این مطالعه روش سطح پاسخ برای تعیین شرایط بهینه آبیگری اسمزی انبه به کمک فراصوت استفاده شد. نتایج آنالیز آماری نشان داد که تمام متغیرهای مستقل شامل دما، غلظت محلول اسمزی، نسبت محلول به نمونه و زمان فراصوت تأثیر معنی داری بر انتقال جرم طی آبیگری اسمزی انبه داشتند. به منظور پیش‌بینی مقادیر از دست دادن آب (WL)، جذب ماده جامد (SG) و کاهش وزن (WR) از مدل چند جمله‌ای درجه دوم استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل برازش شده برای هر سه پاسخ بررسی شده معنی دار بود ($p < 0.01$). در بهینه‌سازی شرایط آبیگری، حداقل سطوح دما، غلظت و نسبت محلول اسمزی به نمونه مد نظر قرار گرفت. در نهایت، شرایط بهینه برای دستیابی به حداکثر WL و WR و حداقل SG، دمای ۳۸ درجه سانتی‌گراد، غلظت ۵۴/۱۸٪ محلول اسمزی، نسبت محلول اسمزی به نمونه ۷/۴۰:۱ و زمان فراصوت ۲۰ دقیقه بود. در شرایط بهینه، مقادیر پاسخ‌های WL، SG و WR به ترتیب ۴۶/۴۸٪، ۷/۸۱٪ و ۳۸/۶۷٪ پیش‌بینی شد. بنابراین، می‌توان نتیجه‌گیری نمود که آبیگری اسمزی-فراصوت می‌تواند یک روش مؤثر برای بهبود قابل توجه انتقال جرم طی فرایند آبیگری باشد. همچنین، هنگام انجام تیمار ترکیبی آبیگری اسمزی-خشک کردن در مورد میوه انبه، این روش می‌تواند برای کاهش زمان کلی فرایند و بهبود کیفیت محصول فرآوری شده (در مقایسه با خشک کردن تنها) مورد توجه قرار گیرد.

سفید گزارش کردند [۳۱]. معادله رگرسیونی به دست آمده برای پاسخ WR پس از حذف عوامل غیرمعنی‌دار به صورت زیر بود ($R^2 = 0.9205$):

$$Y_r (WR, \%) = +26/41 + 1/68 X_2 + 2/55 X_3 + 3/95 X_4 + 5/77 X_1^2 - 2/89 X_3^2 - 1/31 X_{12} - 1/40 X_{13}$$

۳-۴- بهینه‌سازی

در پژوهش حاضر، اهداف بهینه‌سازی آبیگری اسمزی ورقه-های انبه شامل به حداکثر رساندن از دست دادن آب (WL) و حداکثر کاهش وزن (WR) و به حداقل رساندن جذب ماده جامد (SG) بود که در راستای اهداف گزارش شده در سایر پژوهش‌های انجام شده توسط محققین مختلف می‌باشد [۴، ۱۵ و ۱۹]. در نهایت، شرایط بهینه پیشنهادی توسط نرم‌افزار به صورت دمای ۳۸ درجه سانتی‌گراد، غلظت ۵۴/۱۸٪ محلول اسمزی، نسبت وزنی محلول اسمزی به نمونه ۷/۴۰:۱ و زمان فراصوت ۲۰ دقیقه با مطلوبیت ۷۷/۳٪ تعیین شد (شکل ۶). در این شرایط، مقادیر پاسخ‌های WL، SG و WR به ترتیب ۴۶/۴۸٪، ۷/۸۱٪ و ۳۸/۶۷٪ پیش‌بینی شد. مقدار نسبتاً پایین به دست آمده برای دما در شرایط بهینه با توجه به نتیجه حاصل شده برای تأثیر مثبت دما بر افزایش مقدار SG در پژوهش حاضر و همچنین در نظر گرفتن SG با هدف به حداقل رساندن آن در شرایط بهینه‌سازی قابل توجیه است. همچنین، مقادیر بالای به دست آمده برای دما، غلظت و زمان فراصوت در شرایط بهینه در تطابق با نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر مبنی بر افزایش مقدار WL و WR (تا حد معین) با افزایش هر کدام از این متغیرهای مستقل و در نظر گرفتن میزان WL و WR با هدف به حداکثر رساندن آن‌ها در شرایط بهینه‌سازی است. در مجموع، مقادیر به دست آمده در شرایط بهینه نشان‌دهنده آبیگری اسمزی در دمای پایین و با راندمان بالا (کاهش رطوبت حدود ۴۶/۵٪ و جذب ماده جامد کمتر از ۸٪) می‌باشد. بنابراین، می‌توان نتیجه‌گیری نمود که آبیگری اسمزی به کمک فراصوت می‌تواند یک روش مؤثر برای بهبود قابل توجه انتقال جرم طی فرایند آبیگری باشد.

4. Desirability

osmosis and ultrasound on some quality characteristics of dried bananas by hot air. *Iranian Food Science and Technology Research Journal (In Persian)*, 7(4): 263-272.

[12] Xin, Y., Zhang, M., & Adhikari, B. 2013. Effect of trehalose and ultrasound-assisted osmotic dehydration on the state of water and glass transition temperature of broccoli (*Brassica oleracea L. var. botrytis L.*). *Journal of Food Engineering*, 19 (3): 640-647.

[13] Simal, S., Benedito, J., Sanchez, S.E., & Rossello, C. 1998. Use of ultrasound to increase mass transfer rates during osmotic dehydration. *Journal of Food Engineering*, 36: 323-336.

[14] Kek, S.P., Chin, N.L., & Yusof, Y.A. 2013. Direct and indirect power ultrasound assisted pre-osmotic treatments in convective drying of guava slices. *Food and Bioprocess Processing*, 94(4): 495-506.

[15] Noshad, M., Mohebbi, M., Shahidi, F., & Mortazavi, S.A. (2012). Multi-objective optimization of osmotic-ultrasonic pretreatments and hot-air drying of quince using response surface methodology. *Food and Bioprocess Technology*, 5(6): 2098-2110.

[16] Azoubel, P.M., & Murr, F.E.X. 2004. Mass transfer kinetics of osmotic dehydration of cherry tomato. *Journal of Food Engineering*, 61: 291-295.

[17] Uddin, M.B., Ainsworth, P., & İbanoğlu, S. 2004. Evaluation of mass exchange during osmotic dehydration of carrots using response surface methodology. *Journal of Food Engineering*, 65: 473- 477.

[18] Falade, K.O., Igbeka, J.C., & Ayanwuyi, F.A. 2007. Kinetics of mass transfer and colour changes during osmotic dehydration of watermelon. *Journal of Food Engineering*, 80: 979-985.

[19] Singh, B., Panesar, P.S., Nanda, V., & Kennedy, J.F. 2010. Optimization of osmotic dehydration process of carrot cubes in mixtures of sucrose and sodium chloride solutions. *Food Chemistry*, 123: 590-600.

[20] Rafiqh, S.M., Vosoghi, M., Vaziri, A., Seif-Kordi, A.A., & Arjmand, M. 2015. Synthesis, characterization, optimization and modeling of krldan gum from *Paenibacillus polymyxa* by response surface methodology (RSM). *Food Technology and Nutrition*, 12(3): 13-28.

۵- منابع

- [1] Torres, J.D., Talens, P., Escriche, I., & Chiralt, A. 2006. Influence of process conditions on mechanical properties of osmotically dehydrated mango. *International Journal Food Engineering*, 74: 240-246.
- [2] Andres, A., Fito, P., Heredia, A., & Rosa, E. 2007. Combined drying technologies for development of high-quality shelf-stable mango products. *Drying Technology*, 25: 1857-1866.
- [3] Maran, J.P., Sivakumar, V., Thirugnanasambandham, K., & Sridhar, R. 2013. Artificial neural network and response surface methodology modeling in mass transfer parameters predictions during osmotic dehydration of *Carica papaya L.* *Alexandria Engineering Journal*, 52: 507-516.
- [4] Md. Shafiq, A., Amarjit, S., & Sawhney, B.K. 2010. Response surface optimization of osmotic dehydration process for aonla slices. *Journal of Food Science and Technology*, 47(1): 47-54.
- [5] Phisut, N. 2012. Factors affecting mass transfer during osmotic dehydration of fruits. *International Food Research Journal*, 19(1): 7-18.
- [6] Chandra, S., & Kumari, D. 2015. Recent development in osmotic dehydration of fruit and vegetables: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(4): 552-561.
- [7] Nowacka, N., Tylewicz, U., Laghi, L., Dalla Rosa, M., & Witrowa-Rajchert, D. 2014. Effect of ultrasound treatment on the water state in kiwifruit during osmotic dehydration. *Food Chemistry*, 144: 18-25.
- [8] Rodrigues, S., Oliveira, F.I., Gallao, M.I., & Fernandes, F.A.N. 2009. Effect of immersion time in osmosis and ultrasound on papaya cell structure during dehydration. *Drying Technology*, 27(2): 220-225.
- [9] Soria, A.C., & Villamiel, M. 2010. Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of food: a review. *Food Science and Technology*, 21: 323-331.
- [10] Fernandes, F., Gallao, M.I., & Rodrigues, S. 2009. Effect of osmosis and ultrasound on pineapple cell tissue structure during dehydration. *Journal of Food Engineering*, 90: 186-190.
- [11] Shahidi, F., Mohebbi, M., Noshad, M., & Ehtiati, A. 2012. Effect of pre-treatment of

- [26] Chenlo, F., Moriera, R., Pereira, G., & Ampudia, A. 2002. Viscosities of aqueous solutions of sucrose and sodium chloride of interest in osmotic dehydration processes. *Journal of Food Engineering*, 54: 347–352.
- [27] Eren, I., & Kaymak-Ertekin, F. 2007. Optimization of osmotic dehydration of potato using response surface methodology. *Journal of Food Engineering*, 79: 344-352.
- [28] Teles, U.M., Fernandes, F.A.N., Rodrigues S., Lima, A.S., Maia, G.A., & Figueiredo, R.W. 2006. Optimization of osmotic dehydration of melons followed by air drying. *International Journal of Food Science & Technology*, 41: 674–680.
- [29] Silva, M.A., Silva, Z.E., Mariani, V.C., & Darce, S. 2012. Mass transfer during the osmotic dehydration of West Indian cherry. *LWT-Food Science and Technology*, 45: 246-252.
- [30] Yadav, A., & Singh, S. 2014. Osmotic dehydration of fruits and vegetables: A review. *Journal of Food Science and Technology*, 51(9): 1654-1673.
- [31] Mokhtarian, M., Shafafi-Zenoozian, M., Armin, M., & Koshki, F. 2012. Application of a combination of ultrasound-osmosis to increase the mass transfer process in the texture of horseradish. *Innovation in Food Science and Technology*, 4(1): 23-35.
- [21] Ganjlo, A., Rahman, R.A., Bakar, J., Osman, A., & Bimakr, M. 2015. Optimization of osmotic dehydration of seedless guava (*psidium guajava* l.) in sucrose solution using response surface methodology. *International Journal of Food Engineering*, 10(2): 307-316.
- [22] Derossi, A., Severini, C., Del Mastro, A., & De Pilli, T. 2015. Study and optimization of osmotic dehydration of cherry tomatoes in complex solution by response surface methodology and desirability approach. *LWT-Food Science and Technology*, 60: 641-648.
- [23] Garcia-Noguera, J., Oliveira, F.I., Gallão, M.I., Weller, C.L., Rodrigues, S., & Fernandes, F.A. 2010. Ultrasound-assisted osmotic dehydration of strawberries: Effect of pretreatment time and ultrasonic frequency. *Drying Technology*, 28(2): 294-303.
- [24] Dehghannya, J., Gorbani, R., & Ghanbarzadeh, B. 2015. Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment on drying kinetics and effective moisture diffusivity of Mirabelle plum. *Journal of Food Processing and Preservation* (Accepted for publication).
- [25] Association of Official Analytical Chemists (AOAC). 1990. AOAC official method 931.04. Washington, DC, USA.

An investigation of mass transfer phenomenon during ultrasound-assisted osmotic dehydration of mango slices and optimization by response surface methodology

Rigi, S.¹, Naghavi, E.^{2*}

1. M.Sc. Graduated Student, Department of Food Science and Technology, Islamic Azad University, Sabzevar Branch
2. Young Researchers and Elite Club, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran
(Received: 2015/10/11 Accepted: 2016/06/21)

The aim of the present study was to investigate the effect of independent variables, namely, osmotic dehydration temperature (30, 40, 50°C) and concentration (40, 50, 60% w/w), solution to fruit ratio (4:1, 6:1, 8:1 w/w) and time of sonication (0, 10, 20 min) on the mass transfer during ultrasound-assisted osmotic dehydration of mango slices. In addition, optimization of mass transfer parameters was performed to maximize water loss (WL) and weight reduction (WR) as well as to minimize solid gain (SG). Central composite design (CCD) in response surface methodology (RSM) was used for statistical optimization. The results revealed that all the independent variables had a statistically significant effect on the mass transfer parameters. An increase in the osmotic solution concentration resulted in increased WL and WR. Also, the results of ANOVA showed that the fitted model was significant for responses ($p < 0.01$). Moreover, the optimum conditions for the osmotic dehydration of mango were osmotic solution temperature of 38°C, solution concentration of 54.18%, osmotic solution to sample ratio of 7.40:1 and sonication time of 20 min. Under these conditions, the values obtained for the responses of WL, SG and WR were 46.48%, 7.81% and 38.67%, respectively. Therefore, on the whole it can be concluded that ultrasound-assisted osmotic dehydration can be an effective way to increase WL during the process, which in turn can reduce the total process time for the osmotically dehydrated-dried fruits.

Keywords: Osmotic dehydration, Mango, Mass transfer, Optimization, Ultrasound

*Corresponding Author E-Mail Address: Enayat.naghavi@gmail.com