

## Journal Pre-proofs

Effect of Combined Osmotic–Ultrasound Pretreatment on Physical Properties and Surface Microstructure of Freeze-Dried Apple Cubes Using a Two-Dimensional Wavelet Transform Approach

Samira Baratian Ghorghia, Morteza Kashaninejad , Mohsen Heydarib, Khashayar Sarabandic, Alireza Vasieed

DOI: [https://doi.org/ 10.22104/ift.2026.8126.2270](https://doi.org/10.22104/ift.2026.8126.2270)

To appear in: Innovative Food Technologies (IFT)

Received Date: 28 January 2026

Revised Date: 29 March 2026

Accepted Date: 4 April 2026



Please cite this article as: Samira Baratian Ghorghia, Morteza Kashaninejad , Mohsen Heydarib, Khashayar Sarabandic, Alireza Vasieed, Effect of Combined Osmotic–Ultrasound Pretreatment on Physical Properties and Surface Microstructure of Freeze-Dried Apple Cubes Using a Two-Dimensional Wavelet Transform Approach, *Innovative Food Technologies* (2026), doi: [https://doi.org/ 10.22104/ift.2026.8126.2270](https://doi.org/10.22104/ift.2026.8126.2270)

This is a PDF file of an article that has undergone enhancements after acceptance, such as the addition of a cover page and metadata, and formatting for readability, but it is not yet the definitive version of record. This version will undergo additional copyediting, typesetting and review before it is published in its final form, but we are providing this version to give early visibility of the article. Please note that, during the production process, errors may be discovered which could affect the content, and all legal disclaimers that apply to the journal pertain.

© 2026 The Author(s). Published by irost.org.

## اثر پیش تیمار ترکیبی اسمزی - فراصوت بر ویژگی‌های فیزیکی و ریزساختار سطحی حبه سیب خشک شده انجمادی با رویکرد تبدیل موجک دوبعدی

سمیرا براتیان قرقی<sup>۱</sup>، مرتضی کاشانی نژاد<sup>۲\*</sup>، محسن حیدری<sup>۲</sup>، خشایار سرابندی<sup>۳</sup> و علیرضا وسیعی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استادیار گروه فناوری های سبز مواد غذایی، موسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد، ایران

۳- استادیار گروه شیمی مواد غذایی، موسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد، ایران

۴- استادیار گروه ایمنی و کنترل کیفیت مواد غذایی، موسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد، ایران

### چکیده

غلظت محلول اسمزی و مدت زمان فراصوت از عوامل مؤثر بر کارایی فرآیند و ویژگی های کیفی محصول در خشک کردن انجمادی میوه‌ها محسوب می‌شوند و بررسی اثر همزمان این عوامل بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی میوه خشک شده ضروری است. لذا در این پژوهش، اثر غلظت محلول اسمزی ساکارز (۴۰ تا ۶۰ درصد وزنی/وزنی) و زمان پیش تیمار فراصوت (۱۰ تا ۵۰ دقیقه) بر روی کاهش وزن بعد از آبیگری اسمزی، کاهش وزن پس از خشک کردن، جذب مجدد آب، ویژگی‌های بافتی (سختی و چسبندگی)، تغییر رنگ کلی ( $\Delta E$ )، چروکیدگی سطحی، پارامترهای لبه (EL و ED) و زیرباند های تبدیل موجک دوبعدی (HL, LH, LL و HH) حبه های سیب خشک شده به روش انجمادی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از ارزیابی ویژگی‌های اندازه گیری شده با استفاده از روش سطح پاسخ حاکی از آن بود که افزایش غلظت محلول اسمزی به طور معنی داری موجب کاهش چروکیدگی سطحی، تغییر رنگ کلی و پارامترهای لبه شد. افزایش زمان فراصوت نیز سختی را به طور معنی داری کاهش داد در حالی که چسبندگی تحت تأثیر معنی دار هیچ یک از متغیرها قرار نگرفت. در تحلیل تبدیل موجک، زیرباندهای LL و HL به هر دو متغیر پاسخ معنی دار نشان دادند، زیرباند HH تنها به غلظت محلول اسمزی پاسخ داد و زیرباند LH به هیچ متغیری پاسخ معنی دار نداشت. به طور کلی، غلظت محلول اسمزی نقش غالب در حفظ کیفیت ظاهری و ریزساختار سطحی داشت، در حالی که پیش تیمار فراصوت عمدتاً بر ویژگی‌های بافتی مؤثر بود و ترکیب بهینه این دو پیش تیمار می‌تواند منجر به بهبود همزمان چندین شاخص کیفی سیب خشک شده انجمادی گردد.

**واژه‌های کلیدی:** خشک کردن انجمادی، فراصوت، آبیگری اسمزی، پردازش تصویر، تبدیل موجک

۱. مقدمه

خشک کردن یکی از قدیمی ترین و رایج ترین روش های نگهداری مواد غذایی است که با کاهش رطوبت و در نتیجه کاهش فعالیت آبی، شرایط رشد میکروارگانیسم ها و وقوع واکنش های نامطلوب شیمیایی را محدود می کند. با وجود سادگی و کاربرد گسترده خشک کردن های متداول، این فرآیندها اغلب با افت قابل توجه کیفیت محصول از نظر رنگ، بافت، طعم و ارزش تغذیه ای همراه

\* نویسنده مسئول: [Mortazakashaninejad@gmail.com](mailto:Mortazakashaninejad@gmail.com)

هستند [۱]. در این میان، خشک کردن انجمادی به عنوان یکی از پیشرفته‌ترین روش‌های خشک کردن، به دلیل انجام فرآیند در دماهای پایین و حذف آب از طریق تصعید، بالاترین سطح حفظ کیفیت ساختاری و تغذیه‌ای را فراهم می‌آورد [۲]. با این حال، هزینه سرمایه‌گذاری بالا، مصرف انرژی زیاد و زمان طولانی فرآیند، استفاده صنعتی گسترده از این روش را با محدودیت مواجه کرده است. برای کاهش هزینه‌ها و بهینه‌سازی فرآیند خشک کردن انجمادی، استفاده از پیش‌تیمارها به‌ویژه آبیگری اسمزی مورد توجه قرار گرفته است. آبیگری اسمزی یکی از روش‌های مؤثر و نسبتاً ارزان در نگهداری مواد غذایی است که با غوطه‌ور ساختن محصول در محلول‌های غلیظ، موجب خروج بخشی از آب آزاد و کاهش رطوبت اولیه می‌شود. این فرآیند علاوه بر کاهش بار حرارتی مراحل بعدی خشک کردن، می‌تواند به حفظ بهتر رنگ، بافت و ترکیبات حساس به حرارت کمک کند و در نتیجه کیفیت محصول نهایی را بهبود بخشد [۳]. همچنین گزارش شده است که در فرآیند آبیگری اسمزی، به دلیل استفاده محدود و کوتاه‌مدت از هوای گرم در مراحل نهایی، نیاز به انرژی حرارتی به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد.

مطالعات متعددی به بررسی اثر آبیگری اسمزی بر کیفیت میوه‌ها پرداخته‌اند. Lewicki and Porzecka-Pawlak [۴] نشان دادند که آبیگری اسمزی موجب تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای در ساختار سلولی سیب شده و رفتار مکانیکی بافت را دگرگون می‌سازد. Mierzwa and Kowalski [۵] گزارش کردند که پیش‌تیمار اسمزی پیش از خشک کردن، نه تنها زمان فرآیند را کاهش می‌دهد، بلکه به بهبود رنگ و کاهش چروکیدگی نیز منجر می‌شود. Fernandes, Gallão and Rodrigues [۶] نیز کاهش سختی و بهبود یکپارچگی ساختاری بافت را در میوه‌های تیمار شده با آبیگری اسمزی گزارش کردند.

با وجود این مزایا، بازده انتقال جرم در فرآیند آبیگری اسمزی معمولاً محدود بوده و مقاومت‌های داخلی بافت، به‌ویژه دیواره‌های سلولی و لایه اپیدرم، مانع خروج سریع آب از محصول می‌شوند. برای رفع این مشکل، استفاده از فناوری‌های کمکی نوین مطرح شده است. در این میان، امواج فراصوت به‌عنوان یک روش غیرحرارتی و دوستدار محیط زیست، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. امواج فراصوت از طریق ایجاد پدیده کاویتاسیون، ریزجریان‌های مایع و اثر اسفنجی، موجب ایجاد ریزترک‌ها و کانال‌های انتقال جرم در بافت سلولی می‌شوند و بدین ترتیب نفوذپذیری بافت و سرعت انتقال جرم را افزایش می‌دهند [۷].

پژوهش‌های پیشین نشان داده‌اند که ترکیب فراصوت با آبیگری اسمزی می‌تواند به‌طور معناداری فرآیند را تسریع کند. Fernandes, Gallão and Rodrigues [۶] اثر فراصوت را در تغییر ریزساختار سلولی و تسهیل خروج آب گزارش کردند. Shamaei, Emam-Djomeh and Moini [۸] نیز در مطالعه‌ای بر روی میوه کرنبری نشان دادند که فراصوت همزمان با آبیگری اسمزی، سفتی بافت را کاهش داده و ویژگی‌های بافتی محصول خشک‌شده را بهبود می‌بخشد. با این حال، اثرات فراصوت بر ویژگی‌های سطحی و بافت ظاهری محصولات خشک‌شده، به‌ویژه پس از خشک کردن انجمادی، هنوز به‌طور جامع بررسی نشده است.

ارزیابی کیفیت ظاهری و بافت سطحی محصولات خشک‌شده، به‌طور سنتی بر مبنای آزمون‌های حسی یا اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای انجام می‌شود که اغلب ذهنی و زمان‌بر هستند. در سال‌های اخیر، روش‌های پردازش تصویر به‌عنوان ابزارهایی عینی، سریع و غیرمخرب برای تحلیل تغییرات سطحی، چروکیدگی و ناهمواری محصولات غذایی معرفی شده‌اند. تکنیک‌هایی نظیر لبه‌یابی و تبدیل موجک دوبعدی امکان استخراج اطلاعات کمی دقیق از ساختار سطح محصول را فراهم می‌کنند [۹].

با توجه به مطالب فوق، اگرچه پژوهش‌هایی در زمینه آبیگری اسمزی و کاربرد فراصوت در خشک کردن میوه‌ها انجام شده است، اما مطالعات محدودی به بررسی همزمان اثر این پیش‌تیمارهای ترکیبی بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، بافتی و شاخص‌های مبتنی بر پردازش تصویر در سیب خشک‌شده انجمادی پرداخته‌اند. از این‌رو، هدف اصلی این پژوهش، بررسی و بهینه‌سازی اثر زمان پیش‌تیمار فراصوت و غلظت محلول اسمزی بر کیفیت فیزیکی، بافتی و ویژگی‌های سطحی برش‌های سیب خشک‌شده انجمادی با استفاده از روش سطح پاسخ و تحلیل‌های پیشرفته پردازش تصویر است.

## ۲. مواد و روش‌ها

## ۱.۲. تهیه تیمارها

سیب‌های تازه (سیب زرد لبنانی<sup>۱</sup>) با رطوبت اولیه ۸۵ درصد بر مبنای مرطوب پس از برداشت، تا زمان انجام آزمایش‌ها در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی حدود ۴۰ درصد نگهداری شدند تا تغییرات فیزیکوشیمیایی قبل از فرآیند تیمار به حداقل برسد. سپس با استفاده از چاقوی استیل ضدزنگ پس از پوست کنی به قطعات مکعبی یکنواخت با ابعاد ۲۰×۲۰×۲۰ میلی‌متر برش داده شدند. برای کاهش سرعت واکنش قهوه‌ای شدن آنزیمی، بلافاصله پس از برش، نمونه‌ها به مدت ۵ دقیقه در محلول ۱ درصد (وزنی/حجمی) اسیدسیتریک غوطه‌ور گردیدند و سپس با آب مقطر شست‌وشو داده شدند. محلول‌های اسمزی با استفاده از ساکارز در سه سطح انتخابی در بازه ۴۰ تا ۶۰ درصد (وزنی/وزنی) تهیه شدند. سپس نمونه‌های سیب با نسبت نمونه به محلول ۱:۱۰ (وزنی/وزنی) در محلول‌های اسمزی قرار داده شدند. فرآیند تیمار فراصوت با استفاده از دستگاه حمام فراصوت با فرکانس ثابت (۳۷ کیلوهرتز) و توان خروجی ۷۰ درصد انجام شد. به‌منظور جلوگیری از تغییرات دمایی ناشی از امواج فراصوت و حفظ شرایط یکنواخت فرآیند، دمای محیط تیمار در ۲۵ درجه سانتی‌گراد ثابت نگه داشته شد که این کنترل دما با استفاده از حمام آب گرم مجهز به سیستم کنترل دما انجام گرفت. تیمارهای فراصوت مطابق طرح آزمایش سطح پاسخ در سه سطح زمان انتخابی در بازه ۱۰ تا ۶۰ دقیقه صورت گرفت. در مجموع، مطابق جدول ۱، ۱۳ تیمار آزمایشی شامل ترکیب‌های متفاوتی از غلظت محلول اسمزی (عامل A) و مدت زمان فراصوت (عامل B) انجام شد. پس از پایان هر تیمار، نمونه‌ها به سرعت از محلول خارج شده، با آب مقطر شست‌وشو یافتند و توسط کاغذ جاذب خشک و سپس توسط خشک کن انجمادی (دمای ۴۰- درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت) تا رسیدن نمونه‌ها به وزن ثابت خشک و سپس مورد از مون قرار گرفتند.

جدول (۱). متغیرهای مستقل در فرآیند ابگیری اسمزی - فراصوت و سطوح آنها

Table 1. Independent variables and their levels in the osmotic-ultrasonic pretreatment process

تیمار	غلظت محلول اسمزی (درصد)	مدت زمان فراصوت (دقیقه)
۱	۴۰	۱۰
۲	۴۰	۶۰
۳	۴۰	۳۵
۴	۵۰	۱۰
۵	۵۰	۳۵
۶	۵۰	۳۰
۷	۵۰	۶۰
۸	۶۰	۱۰
۹	۶۰	۶۰
۱۰	۶۰	۳۵
۱۱	۵۰	۳۵
۱۲	۵۰	۳۵
۱۳	۵۰	۳۵

## ۲.۲. آزمون بافت (آزمون فشردگی تک مرحله‌ای)

برای انجام آزمون بافت از دستگاه (Texture Analyzer (Stable Micro Systems, London, UK)) استفاده شد. در این آزمون از پروب استوانه‌ای با قطر ۵۰ میلی‌متر و سرعت حرکت پروب برابر ۱ میلی‌متر بر ثانیه استفاده گردید. نمونه‌ها (به ابعاد ۲۰

<sup>1</sup> Golden Delicious

۲۰×۲۰×۲۰ میلیمتر) در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد، تا ۵۰ درصد ارتفاع اولیه مورد آزمون قرار گرفتند. در طول آزمون، منحنی نیرو - تغییر شکل توسط دستگاه ثبت شد. ویژگی های اندازه گیری شده شامل سختی<sup>۱</sup> (ارتفاع پیک اصلی در منحنی با واحد گرم نیرو) و چسبندگی<sup>۲</sup> (مساحت زیر نمودار در قسمت منفی با واحد گرم نیرو ثانیه) بودند [10].

### ۳.۲. کاهش وزن بعد از آبیگری اسمزی<sup>۳</sup>

برای تعیین میزان کاهش وزن نمونه های سیب در طی فرآیند آبیگری اسمزی، ابتدا سیب های تازه پس از شست و شو و پوست گیری به قطعات مکعبی با ابعاد تقریباً یکنواخت برش داده شدند و وزن اولیه هر نمونه با ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم ثبت گردید. سپس نمونه ها در محلول اسمزی ساکارز با غلظت مورد نظر به مدت ۲ ساعت قرار داده شدند. دمای محلول اسمزی در طول آزمایش در حدود ۲۵ درجه سانتیگراد (دمای محیط) نگه داشته شد. برای اطمینان از غوطه وری کامل قطعات سیب و جلوگیری از شناور شدن آنها بر سطح محلول، از یک توری یا شبکه پلاستیکی سبک به عنوان نگهدارنده استفاده شد تا نمونه ها به طور کامل در داخل محلول اسمزی قرار گیرند. پس از پایان این مرحله، نمونه ها از محلول خارج شده، آب سطحی آنها با دستمال کاغذی گرفته شد، و مجدداً وزن گردیدند. مقدار کاهش وزن با مقایسه وزن اولیه نمونه و وزن نمونه پس از آبیگری اسمزی تعیین شد و به صورت درصدی از وزن اولیه گزارش گردید [۳].

### ۴.۲. کاهش وزن بعد از خشک کردن<sup>۴</sup>

جهت تعیین کاهش وزن نمونه ها پس از فرآیند خشک کردن، بعد از اتمام آبیگری اسمزی و ثبت وزن نمونه ها با ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم، آنها وارد مرحله خشک کردن شدند. در پایان مرحله خشک کردن (پایان مرحله خشک کردن بر اساس رسیدن نمونه ها به وزن ثابت تعیین گردید)، نمونه ها به دمای محیط رسانده شده و بلافاصله وزن کشی شدند. میزان کاهش وزن در این مرحله با مقایسه وزن نمونه قبل و بعد از خشک کردن محاسبه و به صورت درصدی از وزن قبل از خشک کردن بیان شد [۱۱].

### ۵.۲. جذب مجدد آب<sup>۵</sup>

نمونه های سیب خشک انتخاب و وزن اولیه آنها با دقت ۰/۰۰۱ گرم ثبت شد. سپس نمونه ها در آب مقطر با نسبت ۱:۲۰ (نمونه خشک به آب) و دمای اتاق قرار گرفتند. پس از ۱۵ دقیقه، نمونه ها خارج، آب سطحی آنها با کاغذ صافی گرفته و مجدداً توزین شدند. درصد جذب مجدد آب براساس اختلاف وزن پیش و پس از آبیگری محاسبه شد [11].

### ۶.۲. چروکیدگی سطحی<sup>۶</sup>

برای محاسبه ی چروکیدگی، از روش پردازش تصویر استفاده شد. تجهیزات عکسبرداری شامل یک اتاقک تاریک (جهت جلوگیری از ایجاد نوسان در عکسبرداری و عدم بازتاب نور) و تنظیم نور توسط لامپ فلورسنت بود. عکسبرداری با استفاده از دوربین سامسونگ SM-N960U1 متصل به رایانه صورت گرفت. دوربین در فاصله ۱۰ سانتیمتری نمونه ها و موازی با آن روی پایه ثابت قرار گرفت. کلیه تصاویر به فرمت JPG و دارای وضوح ۳۰۲۴×۴۰۳۲ پیکسل در قالب مدل رنگی RGB بودند. به منظور حذف بخش های اضافه تصویر برشی از تصاویر با استفاده از نرم افزار Image J (National Institute of Health, USA) به

1. Hardness

2. Adhesive Force

4. Weight Reduction after Drying

6. Surface shrinkage

3. Weight Reduction after Osmotic Dehydration

5. Rehydration

دست آمد و سپس آنالیز تصاویر نیز با استفاده از همین نرم افزار صورت پذیرفت. بدین منظور تصاویر نمونه‌های سیب برش خورده قبل و بعد از فرایند خشک شدن گرفته شد. پس از آنالیز تصاویر گرفته شده به کمک پردازش تصویر، مساحت رویه نمونه‌های سیب اندازه‌گیری شد. درصد چروکیدگی نیز از رابطه ۱ محاسبه شد:

$$Sh = \frac{A_f - A_d}{A_f} \times 100 \quad (1)$$

که در آن Sh بیانگر درصد چروکیدگی نمونه‌ها،  $A_f$  و  $A_d$  به ترتیب مساحت رویه نمونه‌های سیب برش خورده تازه و خشک شده (cm<sup>2</sup>) می‌باشد [11].

## ۷.۲. تغییرات کلی رنگ

جهت اندازه‌گیری تغییرات رنگی نمونه‌های خشک شده، پارامترهای رنگی ( $b^*, a^*, L^*$ ) نمونه‌های تازه و خشک شده از تصاویر تهیه شده از سامانه به روش پردازش تصویر اندازه‌گیری شدند. تغییرات کلی رنگ نمونه‌ها نیز با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد.

$$\Delta E = \sqrt{(L_f - L_d)^2 + (b_f - b_d)^2 + (a_f - a_d)^2} \quad (2)$$

که در آن،  $\Delta E$  تغییرات کلی رنگ نمونه (بدون بعد)، اندیس‌های  $f$  و  $d$  به ترتیب بیانگر پارامترهای رنگی نمونه تازه و خشک شده است [12].

## ۸.۲. استخراج نقشه لبه‌ها<sup>۱</sup>

به منظور تحلیل کمی ویژگی‌های سطحی برش‌های سیب خشک شده انجمادی، تصاویر خاکستری نمونه‌ها با استفاده از الگوریتم Canny به نقشه لبه‌های دودویی تبدیل گردید. پارامترهای آستانه پایین و بالای الگوریتم نیز با روش آستانه‌گیری خودکار مبتنی بر هیستوگرام گرادینان تنظیم شد تا لبه‌های اصلی سطح شامل ترک‌ها، شیارها و مرزهای ناشی از ناهمواری با حداقل نویز استخراج گردند. استفاده از آستانه‌گیری خودکار امکان سازگاری الگوریتم با تغییرات روشنایی و کنتراست بین نمونه‌های مختلف را فراهم نمود [۱۳]. طول کل لبه‌ها<sup>۲</sup> در هر تصویر با جمع‌زدن پیکسل‌های لبه در نقشه دودویی و ضرب در ضریب مقیاس فضایی (بر حسب میکرومتر بر پیکسل) محاسبه گردید. اگر  $E$  ماتریس دودویی لبه‌ها (مقادیر ۰ یا ۱) و  $\text{pixel\_size}$  اندازه واقعی هر پیکسل بر حسب میکرومتر باشد، آنگاه:

$$\text{Edge Length} = (\sum_{i,j} E) \times \text{pixel\_size} \quad (3)$$

این مقدار بیانگر طول کل خطوط لبه در واحد میکرومتر در سطح نمونه است. چگالی لبه<sup>۳</sup> نیز به عنوان نسبت مساحت اشغال شده توسط لبه‌ها به مساحت کل ناحیه تحلیل شده تعریف می‌شود. از آنجا که هر پیکسل لبه دارای عرض یک پیکسل در نظر گرفته می‌شود، چگالی لبه از رابطه ۴ به دست می‌آید:

$$\text{Edge Density} = \frac{\sum i,j}{N \text{ total pixels}} \quad (4)$$

که در آن  $N \text{ total pixels}$  تعداد کل پیکسل‌های ناحیه مورد بررسی است. این کمیت بدون بعد (بین ۰ تا ۱) نشان‌دهنده تراکم لبه‌ها در واحد سطح می‌باشد.

<sup>1</sup>. Edge map

<sup>2</sup>. Edge length

<sup>3</sup>. Edge density

تمامی مراحل پردازش تصویر و محاسبات با استفاده از کتابخانه (OpenCV) ورژن x4 در محیط Python 3.9 پیاده‌سازی شد. کدهای مربوطه شامل بارگذاری تصویر، تبدیل به خاکستری، اعمال فیلتر گاوسی (برای هموارسازی اولیه)، اجرای الگوریتم Canny و محاسبه طول و چگالی لبه‌ها می‌باشد.

### ۹.۲. تحلیل بافت سطحی به روش تبدیل موجک

تبدیل موجک گسسته دوبعدی با استفاده از موجک مادر (Daubechies (db4)) در سطح تجزیه‌ی مشخص (سطح یک) بر روی تصاویر سطح خاکستری نمونه‌های خشک‌شده اعمال شد. این تبدیل، تصویر اصلی را به چهار زیرباند فرکانسی شامل زیرباند تقریب<sup>۱</sup> (LL)، زیرباند جزئیات عمودی<sup>۲</sup> (HL)، زیرباند جزئیات افقی<sup>۳</sup> (LH) و زیرباند جزئیات قطری<sup>۴</sup> (HH) تجزیه می‌کند. زیرباند LL حاصل اعمال فیلتر پایین‌گذر در هر دو جهت افقی و عمودی بوده و نمایانگر اطلاعات کلی و ساختار اصلی تصویر است. زیرباند HL از اعمال فیلتر بالاگذر در جهت عمودی و فیلتر پایین‌گذر در جهت افقی به‌دست می‌آید و لبه‌ها و تغییرات عمودی بافت را نشان می‌دهد. زیرباند LH حاصل اعمال فیلتر پایین‌گذر در جهت عمودی و فیلتر بالاگذر در جهت افقی بوده و لبه‌ها و تغییرات افقی بافت را نمایش می‌دهد. زیرباند HH از اعمال فیلتر بالاگذر در هر دو جهت حاصل شده و جزئیات ریز و تغییرات قطری بافت را آشکار می‌سازد. از هر زیرباند، میانگین قدر مطلق ضرایب به‌عنوان شاخص کمی بافت سطحی طبق رابطه‌ی ۵ محاسبه گردید [۱۴]:

$$C = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |c(i, j)| \quad (5)$$

که در آن  $C(j, i)$  مقدار ضریب موجک در موقعیت  $(j, i)$  و  $N \times M$  ابعاد ماتریس ضرایب زیرباند مربوطه است. چهار ویژگی استخراج‌شده شامل  $C_{LL}$ ،  $C_{HL}$ ،  $C_{LH}$  و  $C_{HH}$  به‌عنوان شاخص‌های کمی توصیف‌کننده‌ی بافت سطحی جهت ارزیابی تأثیر شرایط آبیگری اسمزی و مدت زمان پیش‌تیمار فراصوت بر ویژگی‌های ظاهری حبه‌های سیب خشک‌شده به‌کار گرفته شدند. تمامی محاسبات مربوط به تبدیل موجک و استخراج ویژگی‌ها با استفاده از زبان برنامه‌نویسی Python نسخه‌ی ۳.۹ و کتابخانه‌ی PyWavelets نسخه‌ی ۱.۴ انجام پذیرفت.

### ۳. نتایج و بحث

#### ۱.۳. مدل سازی

معادلات به دست آمده برای پیش‌بینی متغیرهای وابسته با استفاده از طرح آزمایشی سطح پاسخ بر پایه طرح مرکب مرکزی<sup>۵</sup> برای متغیرهای معنی‌دار در جدول ۲ آمده است. برای بررسی صحت مدل از ضرایب تبیین ( $R^2$ ) و تست عدم برازش استفاده گردید. همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده است ضریب تبیین برای کلیه صفات اندازه‌گیری شده بالاتر از ۰/۸ بوده و فاکتور عدم برازش نیز برای کلیه صفات اندازه‌گیری شده در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار نمی‌باشد. بنابراین بالا بودن ضریب تبیین و معنی‌دار نبودن عدم برازش برای تمامی پاسخ‌ها صحت مدل را برای برازش اطلاعات تأیید می‌کند. برای مشاهده بهتر اثر متغیرهای مستقل بر روی صفات مورد آزمایش، نمودارهای سطح پاسخ برای هر صفت رسم گردید.

جدول (۲). معادلات به دست آمده برای پیش‌بینی متغیرهای وابسته با استفاده از طرح آزمایشی سطح پاسخ

**Table 2.** The equations obtained for predicting the dependent variables using the response surface methodology experimental design

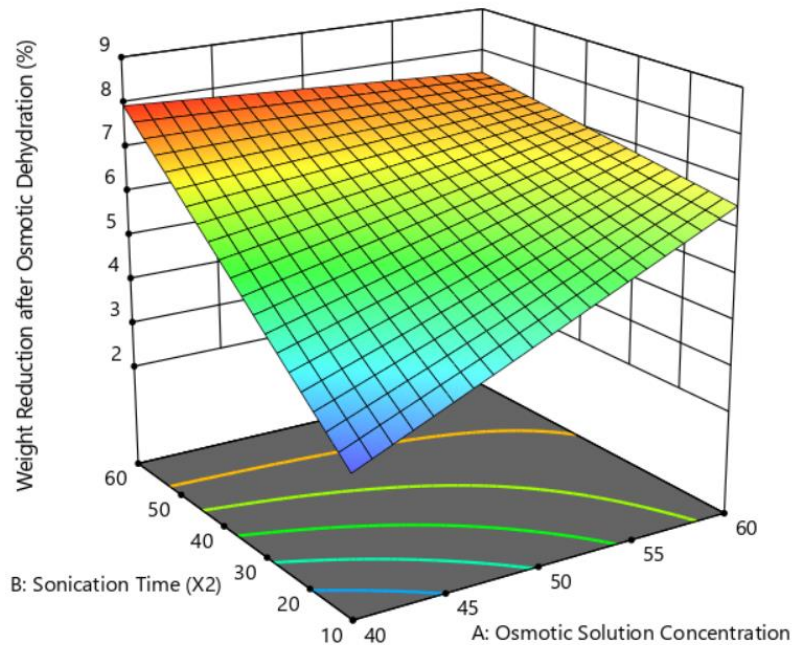
- <sup>1</sup> Approximation sub-band
- <sup>2</sup> Horizontal detail Sub-band
- <sup>3</sup> Vertical detail sub-band
- <sup>4</sup> Diagonal detail sub-band
- <sup>5</sup> Central Composite Design

متغیر های وابسته	معادله	F Value	p-value Prob > F	ضریب تبیین	ضریب تغییرات	عدم برازش
کاهش وزن بعد از آبیگری اسمزی	(1) $Weight\ Reduction\ after\ Osmotic\ Dehydration = -7.5 + 0.23A + 0.27B - 0.004AB$	۷۶۴/۷	۰/۰۰۰۱	۰/۹۹	۱/۵۸	n.S
کاهش وزن پس از خشک کردن	(2) $Weight\ Reduction\ after\ Drying = 71.85 + 0.07A + 0.42B - 0.006AB$	۲۱/۹	۰/۰۰۱۲	۰/۹۱	۰/۶۷	n.S
جذب مجدد آب	(3) $Rehydration = 84.39 - 0.76A - 0.83B + 0.01AB + 0.002B2$	۱۲۶/۹	۰/۰۰۰۱	۰/۹۹	۰/۴۳	n.S
سختی	(4) $Hardness = -0.44 + 47A + 13.8B + 4.27C - 6.9AB - 4.8A2 + 0.007B2$	۶/۳۹	۰/۰۰۲۶	۰/۷۴	۱۴/۲۲	n.S
چروکیدگی سطحی	(5) $Surface\ shrinkage = -210 + 10.8A - 1.1B + 0.03AB - 0.12A2 - 0.007B2$	۱۰/۱۳	۰/۰۱	۰/۹۱	۲۰/۴۷	n.S
تغییر رنگ کلی	(6) $\Delta E = -4.46 + 0.7A - 0.27B + 0.004AB - 0.01A2 + 0.0008B2$	۹/۸۱	۰/۰۱	۰/۹۲	۱۰/۷۰	n.S

### ۲.۳. کاهش وزن بعد از آبیگری اسمزی

کاهش وزن پس از آبیگری اسمزی یکی از شاخص‌های کلیدی برای ارزیابی کارایی فرآیند پیش تیمار اسمزی محسوب می‌شود. این شاخص بیانگر کاهش نسبی وزن نمونه در اثر خروج آب و همچنین نفوذ بخشی از مواد حل شده از محلول اسمزی به درون ماتریکس بافتی است [۶]. کاهش وزن معمولاً به صورت درصد تغییر وزن اولیه نسبت به وزن پس از تیمار گزارش شده و بازتاب مستقیم شدت انتقال جرم بین ماده غذایی و محیط اسمزی می‌باشد [۱۵]. میزان و سرعت کاهش وزن تحت تأثیر پارامترهایی نظیر غلظت محلول اسمزی، دما، نسبت نمونه به محلول و زمان تیمار قرار دارد.

نتایج پژوهش نشان داد که کاهش وزن بعد از آبیگری اسمزی نمونه‌ها بین ۲/۷۲ و ۸/۰۴ درصد متغیر بودند. آنالیز واریانس نیز نشان داد که اثرات خطی و متقابل غلظت محلول اسمزی و مدت زمان فراصوت در سطح اطمینان ۹۹ درصد بر کاهش وزن بعد از آبیگری اسمزی نمونه‌ها معنی‌دار بود. شکل ۱ تأثیر غلظت محلول اسمزی و مدت زمان فراصوت بر کاهش وزن بعد از آبیگری اسمزی نمونه‌ها را با توجه به معادله ۱ (جدول ۲) نشان می‌دهد.



شکل (۱). تأثیر غلظت محلول اسمزی و مدت زمان فراصوت بر کاهش وزن بعد از آبیگری اسمزی نمونه‌های سیب

**Fig 1.** Effect of osmotic solution concentration and sonication time on weight reduction after osmotic dehydration of apple samples

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، در غلظت‌های پایین محلول اسمزی (۴۰ تا ۵۰ درصد) با افزایش مدت‌زمان اعمال فراصوت، میزان کاهش وزن به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد، در حالی که در غلظت‌های بالاتر (۵۵ تا ۶۰ درصد) این افزایش ملایم‌تر است. این الگو با برهم‌کنش دو مکانیسم قابل تبیین است: در غلظت‌های پایین، گرادیان فشار اسمزی ضعیف‌تر بوده و بافت ساختار نفوذپذیرتری دارد؛ در این شرایط، فراصوت از طریق ایجاد اثر اسفنجی و کاویتاسیون موجب گسترش میکروکانال‌ها و تسریع خروج رطوبت می‌گردد [۱۶]. در مقابل، در غلظت‌های بالا، بافت به‌دلیل جذب مواد جامد متراکم‌تر شده و نفوذپذیری کاهش می‌یابد، لذا اثر فراصوت محدودتر می‌شود [۴].

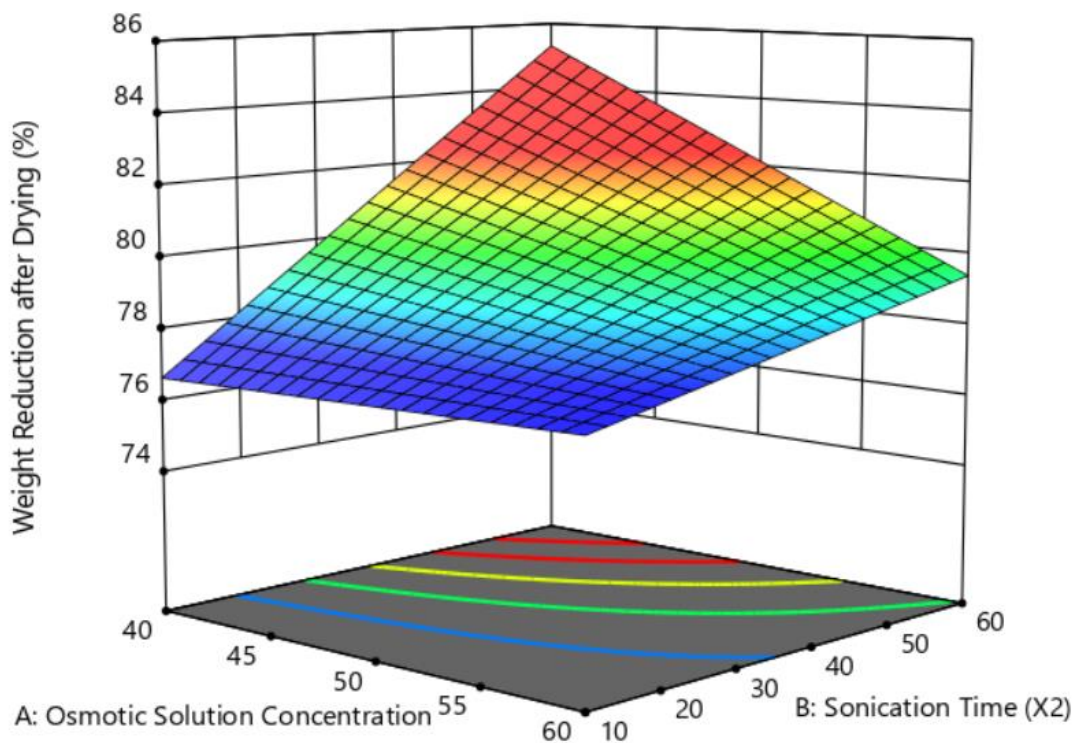
در زمان‌های کوتاه اعمال فراصوت، افزایش غلظت محلول اسمزی با تقویت گرادیان فشار اسمزی، خروج آب از بافت را تسریع می‌کند [۱۷]. با این حال، در زمان‌های طولانی‌تر فرآیند (۵۰ تا ۶۰ دقیقه)، بخش عمده‌ای از خروج آب ناشی از تغییرات ساختاری اولیه در بافت قبلاً رخ داده است. علاوه بر این، در غلظت‌های بالاتر ممکن است نفوذ و تجمع مواد جامد در سطح و منافذ بافت موجب افزایش مقاومت انتقال جرم یا انسداد نسبی مجاری شود. این پدیده می‌تواند نفوذپذیری بافت را کاهش داده و در نتیجه باعث شود که افزایش بیشتر غلظت محلول اسمزی در زمان‌های طولانی تأثیر اضافی محدودی بر میزان خروج آب داشته باشد [۷]. پژوهش‌های پیشین این یافته‌ها را تأیید می‌کنند. Fernandes, Gallão and Rodrigues [۶] گزارش کردند که اثر فراصوت بر افزایش ضریب نفوذ رطوبت در میوه‌هایی نظیر آناناس در شرایط اسمزی ضعیف‌تر برجسته‌تر است. همچنین Garcia-Noguera et al. [۱۸] نشان دادند که در استفاده از فراصوت، غلظت‌های متوسط محلول اسمزی بیشترین کارایی را در افزایش آب‌زدایی دارند.

### ۳.۳. کاهش وزن پس از خشک‌کردن

کاهش وزن پس از خشک‌کردن یکی از شاخص‌های کلیدی در ارزیابی کارایی فرآیند خشک‌کردن است که بیانگر میزان افت وزن نمونه نسبت به وزن اولیه پیش از مرحله خشک‌کردن نهایی می‌باشد. این پارامتر منعکس‌کننده مقدار آب باقیمانده پس از

پیش تیمارها و بخشی از تلفات مواد فرآر است [۴]. این شاخص علاوه بر ارائه اطلاعاتی درباره تغییرات جرم نمونه در طی فرآیند خشک کردن، در شرایطی که آبگیری اسمزی به عنوان پیش تیمار مورد استفاده قرار می گیرد، منعکس کننده انتقال جرم همزمان شامل خروج آب از بافت و نفوذ مواد محلول اسمزی به داخل نمونه نیز می باشد. بنابراین، تغییرات وزن نمونه حاصل برهم کنش این دو پدیده انتقالی است. از این رو، این شاخص می تواند به عنوان معیاری برای ارزیابی اثرات پیش تیمارهایی نظیر آبگیری اسمزی و فراصوت بر رفتار انتقال جرم و عملکرد فرآیند خشک کردن مورد استفاده قرار گیرد [۶].

نتایج پژوهش نشان داد که کاهش وزن بعد از خشک کردن نمونه ها بین ۷۷/۵ و ۸۲/۳۵ درصد متغیر بودند. آنالیز واریانس نیز نشان داد که اثرات خطی و متقابل غلظت محلول اسمزی و مدت زمان فراصوت در سطح اطمینان ۹۹ درصد بر کاهش وزن بعد از خشک کردن نمونه ها معنی دار بود. شکل ۲ تأثیر غلظت محلول اسمزی و مدت زمان فراصوت بر کاهش وزن بعد از خشک کردن نمونه ها را با توجه به معادله ۲ (جدول ۲) نشان می دهد.



شکل (۲). تأثیر غلظت محلول اسمزی و مدت زمان فراصوت بر کاهش وزن بعد از خشک کردن نمونه های سیب

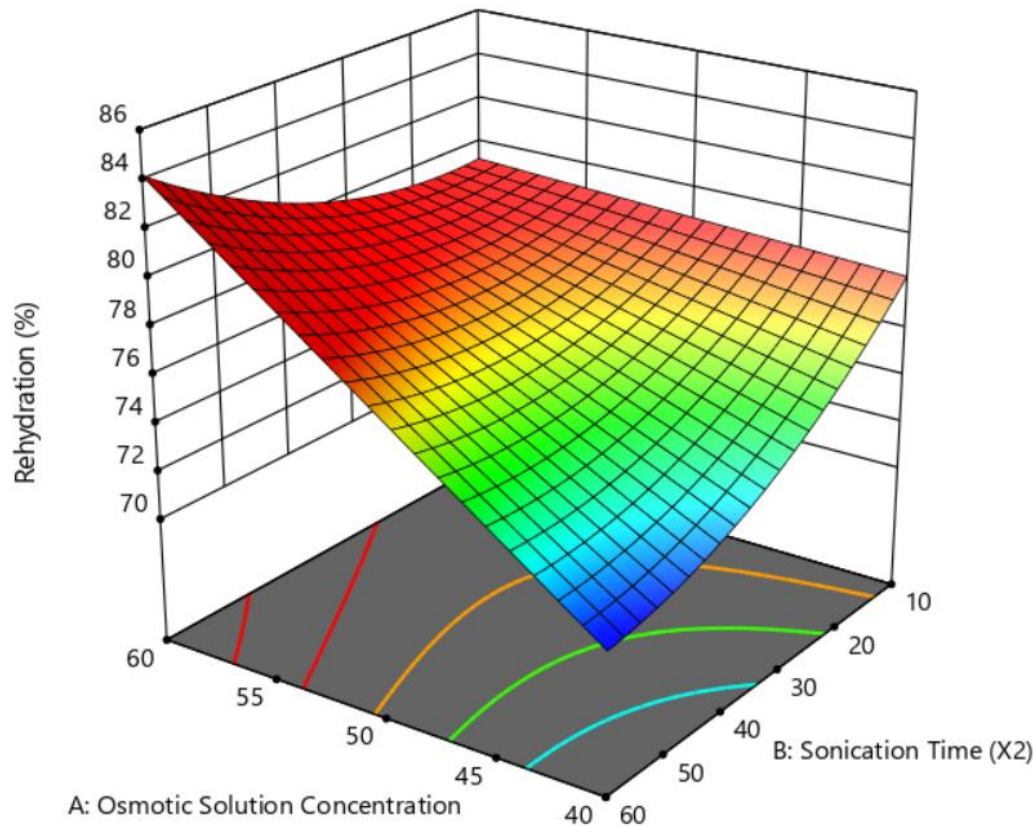
Fig 2. Effect of osmotic solution concentration and sonication time on weight reduction after drying of apple samples

مطابق شکل ۲، افزایش زمان اعمال امواج فراصوت منجر به افزایش معنی دار شاخص کاهش وزن پس از خشک کردن در غلظت های پایین محلول اسمزی (۴۰ تا ۵۰ درصد) می شود. این رفتار را می توان به اثرات مکانیکی و فیزیکی ناشی از فراصوت نسبت داد. امواج فراصوت از طریق پدیده هایی نظیر کاویتاسیون و اثر اسفنجی باعث ایجاد چرخه های متناوب انبساط و انقباض در بافت شده و در نتیجه، کانال های میکروسکوپی متعددی در ساختار سلولی ایجاد می کنند که انتقال رطوبت را تسهیل می نماید [۷]. این کانال ها به عنوان مسیرهای ترجیحی برای خروج آب عمل کرده و ضریب نفوذ مؤثر رطوبت را افزایش می دهند، امری که در نهایت به کاهش وزن بیشتر نمونه ها پس از خشک کردن منجر می شود. در غلظت های پایین محلول اسمزی، به دلیل نفوذ محدود مواد جامد

به داخل بافت، ساختار سلولی هنوز متراکم نشده و مقاومت داخلی در برابر انتقال جرم پایین است. در چنین شرایطی، اثر تقویتی فراصوت به طور مؤثرتری بروز می‌یابد و هم‌افزایی مناسبی بین پیش‌ تیمار فراصوت و فرآیند آبیگری اسمزی ایجاد می‌شود [۱۹]. در مقابل، با افزایش غلظت محلول اسمزی (۵۵ تا ۶۰ درصد) و به‌ویژه در زمان‌های طولانی اعمال فراصوت (۴۰ تا ۶۰ دقیقه)، شاخص کاهش وزن پس از خشک‌کردن کاهش می‌یابد. این پدیده عمدتاً ناشی از نفوذ بیشتر مواد جامد محلول به داخل بافت در مرحله اسمز است که منجر به افزایش تراکم بافتی، سخت‌شدگی نسبی سطح و کاهش نفوذپذیری مؤثر رطوبت می‌شود [۴]. در چنین شرایطی، حتی با افزایش زمان فراصوت، کارایی کانال‌های ایجادشده برای خروج رطوبت کاهش یافته و ظرفیت آزادسازی آب در مرحله خشک‌کردن محدود می‌گردد. نتایج گزارش‌شده توسط Mierzwa and Kowalski [۵] نیز نشان می‌دهد که بیشترین تأثیر مثبت فراصوت بر انتقال جرم زمانی حاصل می‌شود که ساختار بافت هنوز دچار تراکم شدید ناشی از اسمز نشده باشد.

### ۴.۳. جذب مجدد آب

جذب مجدد آب فرآیندی است که طی آن محصول خشک‌شده پس از تماس با محیط مایع، بخشی از رطوبت از دست‌رفته خود را دوباره جذب می‌کند. این فرآیند می‌تواند تا حدی موجب بهبود برخی ویژگی‌های فیزیکی-حسی در مقایسه با حالت کاملاً خشک شود، اما به دلیل تغییرات ساختاری ایجادشده در مرحله خشک‌کردن، بازگشت کامل ساختار اولیه امکان‌پذیر نیست. همچنین در طی جذب مجدد آب ممکن است بخشی از ترکیبات محلول، مانند مواد مغذی یا طعم‌دهنده‌ها، از محصول خارج شود. به همین دلیل، جذب مجدد آب بیشتر به‌عنوان شاخصی برای ارزیابی تغییرات ایجادشده در بافت و قابلیت برگشت‌پذیری نسبی محصول خشک‌شده به کار می‌رود. این پدیده نیازمند درک دقیق از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ماده خشک‌شده و همچنین شرایط تماس با آب است تا بتوان فرآیند جذب مجدد آب را به‌درستی ارزیابی و کنترل کرد. عواملی مانند ساختار بافت محصول، میزان تخلخل ایجادشده در طی خشک‌کردن و شرایط فرآیند جذب مجدد آب می‌توانند بر میزان و سرعت نفوذ آب به داخل بافت تأثیرگذار باشند [۲۰]. از دیدگاه علمی، قابلیت جذب مجدد آب معیاری کلیدی برای ارزیابی کیفیت فرآیند خشک‌کردن و تیمارهای پیش‌خشک‌کردن محسوب می‌شود. تغییرات ساختاری و ترکیبی بافت که در حین فرآوری ایجاد می‌شوند، مستقیماً بر سرعت و ظرفیت بازیابی رطوبت تأثیر می‌گذارند؛ از این‌رو، جذب مجدد آب را می‌توان شاخصی از میزان تغییرات رخ داده در طی فرآوری در نظر گرفت [۲۱]. علاوه بر این، روش خشک‌کردن، پارامترهای فرآیند، پیش‌ تیمارهای اعمال‌شده و آسیب‌های وارده به ریزساختار داخلی همگی بر ویژگی‌های بازسازی محصول تأثیرگذارند [۲۰]. قابلیت جذب مجدد آب مناسب یکی از شاخص‌های مهم کیفیت در محصولات خشک‌شده محسوب می‌شود، زیرا بازجذب سریع و یکنواخت آب می‌تواند زمان آماده‌سازی محصول برای مصرف یا فرآوری بعدی را کاهش داده و کارایی استفاده از این محصولات در کاربردهای صنعتی و غذایی را بهبود بخشد [۲۱]. نتایج پژوهش نشان داد که جذب مجدد آب نمونه‌ها بین ۷۰/۸۳ و ۷۸/۵۷ درصد متغیر بودند. آنالیز واریانس نیز نشان داد که اثرات خطی و متقابل غلظت محلول اسمزی و مدت زمان فراصوت در سطح اطمینان ۹۹ درصد بر جذب آب نمونه‌ها معنی‌دار بود. شکل ۳ تأثیر غلظت محلول اسمزی و مدت زمان فراصوت بر جذب مجدد آب نمونه‌ها را با توجه به معادله ۳ (جدول ۲) نشان می‌دهد.



شکل (۳). تأثیر غلظت محلول اسمزی و مدت زمان فراصوت بر جذب مجدد آب نمونه‌های سیب  
**Fig 3.** Effect of osmotic solution concentration and sonication time on rehydration of apple samples

شکل ۳ نشان می‌دهد که رفتار جذب مجدد آب نمونه‌ها تحت تأثیر برهم‌کنش دو عامل غلظت محلول اسمزی و مدت‌زمان اعمال امواج فراصوت قرار دارد. در غلظت‌های بالای محلول اسمزی (۵۰ تا ۶۰ درصد)، افزایش زمان فراصوت موجب افزایش ظرفیت جذب مجدد آب می‌شود. این پدیده را می‌توان به چندین مکانیزم نسبت داد. نخست، گرادیان فشار اسمزی بالا موجب خروج قابل‌توجه آب از بافت و جایگزینی نسبی آن با مواد جامد محلول می‌شود. با این حال، این فرایند در مراحل اولیه غالب است و به‌ویژه در غلظت‌های پایین تا متوسط محلول اسمزی مشاهده می‌شود. با افزایش غلظت محلول و نفوذ بیشتر مواد جامد به داخل بافت، ساختار سلولی به‌تدریج متراکم‌تر شده و مقاومت انتقال جرم افزایش می‌یابد. در نتیجه، نفوذپذیری بافت کاهش یافته و اثر تقویتی فراصوت در انتقال جرم تا حدی محدود می‌شود. بنابراین، رفتار مشاهده‌شده ناشی از برهم‌کنش بین گرادیان اسمزی بالا در مراحل اولیه و تغییرات ساختاری ناشی از تجمع مواد جامد در غلظت‌های بالاتر است [۲۰]. دوم، در غلظت‌های بالاتر محلول اسمزی، نفوذ مواد جامد به شبکه سلولی می‌تواند موجب افزایش پایداری مکانیکی بافت و کاهش تخریب ساختار شود. در نتیجه، ساختار سلولی حفظ‌شده‌تر بوده و توانایی بیشتری برای جذب مجدد آب در طی فرآیند بازآگیری از خود نشان می‌دهد [۴]. در مقابل، در غلظت‌های پایین‌تر محلول اسمزی (۴۰ تا ۵۰ درصد)، به دلیل خروج آب کمتر و جذب محدود مواد جامد، بافت حاصل نسبتاً شکننده‌تر و با پایداری کمتر است.

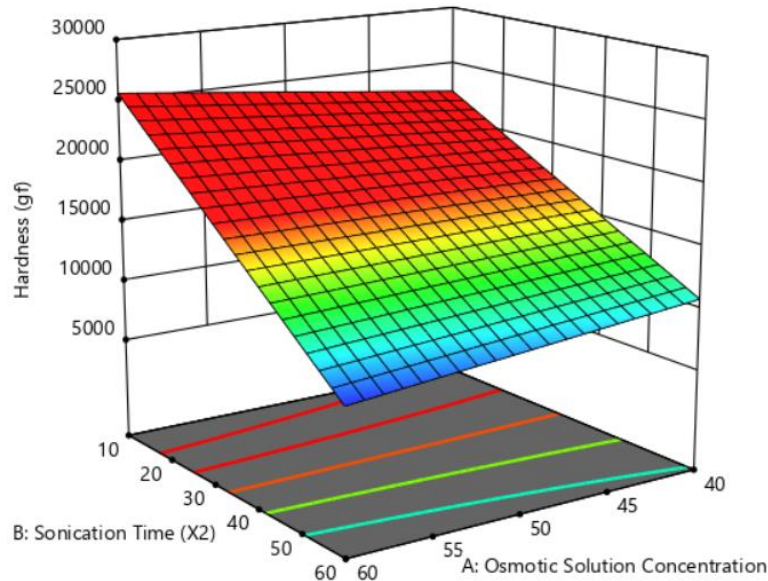
افزایش بیش‌ازحد زمان اعمال فراصوت می‌تواند موجب ایجاد آسیب مکانیکی شدید، تخریب دیواره سلولی و آبشویی ترکیبات محلول داخلی شود. این تخریب ساختاری، توانایی نمونه را برای جذب مجدد آب در مرحله بازآگیری کاهش می‌دهد [۲۰]. همچنین در زمان‌های طولانی‌تر اعمال فراصوت، غلظت محلول اسمزی می‌تواند بر رفتار جذب مجدد آب تأثیر قابل توجهی داشته

باشد. از یک سو، نفوذ بیشتر مواد جامد به داخل بافت ممکن است با افزایش پایداری ساختار سلولی و کاهش جمع‌شدگی، شرایط مساعدتری برای جذب مجدد آب فراهم کند. از سوی دیگر، در غلظت‌های بالای محلول اسمزی و زمان‌های طولانی فرآیند، امکان تشکیل لایه‌ای از مواد محلول بر سطح نمونه وجود دارد که می‌تواند مقاومت انتقال جرم را افزایش داده و میزان جذب مجدد آب را محدود کند. بنابراین، رفتار جذب مجدد آب در این شرایط حاصل برهم‌کنش میان تغییرات ساختاری داخل بافت و مقاومت انتقال جرم در سطح نمونه است [۲۱]. این هم‌افزایی موجب می‌شود بالاترین میزان جذب مجدد آب در شرایط همزمان بیشترین غلظت محلول و بیشترین مدت فراصوت حاصل شود. Fernandes, Gallão and Rodrigues [۶] نشان دادند که نفوذ مواد جامد در غلظت بالا همراه با ساختار متخلخل ناشی از فراصوت، بازجذب آب را بهبود می‌بخشد. Mierzwa and Kowalski [۵] نیز در بررسی خشک‌کردن سیب دریافتند که پیش‌تیمار فراصوت-اسمزی با ایجاد کانال‌های نفوذی و حفظ ساختار سلولی، ویژگی‌های بازآبدهی را ارتقا می‌دهد.

### ۵.۳. سختی

سختی یکی از شاخص‌های کلیدی ارزیابی بافت مواد غذایی است که بیانگر مقاومت ماده در برابر نیروی فشاری یا تغییر شکل می‌باشد و به‌طور مستقیم به ساختار میکروسکوپی، چیدمان سلولی و میزان رطوبت بافت وابسته است. این پارامتر در محصولات خشک‌شده، علاوه بر تأثیر بر ویژگی‌های حسی و پذیرش مصرف‌کننده، معیاری برای ارزیابی اثر شرایط فرآوری و پیش‌تیمارها بر یکپارچگی بافت محسوب می‌شود [۵]. در فرآورده‌های میوه‌ای، تغییرات سختی عمدتاً تحت تأثیر عواملی نظیر نوع و شدت پیش‌تیمارها (مانند تیمارهای اسمزی یا فراصوت)، روش و دمای خشک‌کردن، میزان نفوذ مواد جامد و درصد رطوبت نهایی قرار دارد. مطالعات نشان داده است که روش خشک‌کردن تأثیر معنی‌داری بر سختی محصول دارد؛ به‌طوری‌که افزایش دمای خشک‌کردن موجب تخریب ساختار دیواره سلولی و افزایش استحکام بافت می‌شود [۲۲]. کاهش بیش‌ازحد رطوبت یا تخریب شدید دیواره سلولی در حین فرآوری می‌تواند سختی محصول را افزایش داده و به بافت شکننده و ترد منجر شود، در حالی‌که حفظ ساختار سلولی و میزان مشخصی از رطوبت منجر به بافت نرم‌تر و پذیرش حسی بهتر می‌گردد [۲۰].

نتایج پژوهش نشان داد که سختی نمونه‌ها بین ۸۰۷۲/۴۴ و ۱۷۵۹۵/۵ گرم نیرو متغیر بودند. آنالیز واریانس نیز نشان داد که تنها مدت زمان فراصوت در سطح اطمینان ۹۹ درصد بر سختی نمونه‌ها معنی‌دار بود و غلظت محلول اسمزی هیچگونه اثر آماری معنی‌داری بر سختی نمونه‌ها نداشت. شکل ۴ تأثیر غلظت محلول اسمزی و مدت زمان فراصوت بر سختی نمونه‌ها را با توجه به معادله ۴ (جدول ۲) نشان می‌دهد.



شکل (۴). تأثیر غلظت محلول اسمزی و مدت زمان فراصوت بر سختی نمونه‌های سیب  
**Fig 4.** Effect of osmotic solution concentration and sonication time on hardness of apple samples

همانگونه که در شکل ۴ مشاهده می شود افزایش مدت زمان تیمار فراصوت موجب کاهش معنی دار سختی نمونه‌ها می گردد، در حالی که تغییرات غلظت محلول اسمزی اثری بر سختی نشان نمی دهد. امواج فراصوت با ایجاد اثر اسفنجی و کاویتاسیون، چرخه‌های متوالی فشردگی و انبساط موضعی در بافت ایجاد می کنند که منجر به گسترش کانال‌های میکروسکوپی و تخریب دیواره‌های سلولی می گردد [۶]. این تغییرات ساختاری انسجام مکانیکی بافت را کاهش داده و سختی محصول نهایی را کم می کند. افزایش زمان فراصوت شدت این تخریب را بیشتر نموده و مقاومت فشاری محصول را کاهش می دهد [۵]. در مقابل، غلظت محلول اسمزی از طریق ایجاد گرادیان فشار اسمزی و تغییر در تبادل جرم می تواند بر ساختار بافت اثر بگذارد. با این حال، در محدوده غلظت‌های مورد بررسی در این مطالعه، به نظر می رسد تغییرات ساختاری ناشی از فرایند اسمز برای ایجاد اختلاف معنی دار در سختی نمونه‌ها کافی نبوده است. Shamaei, Emam-Djomeh and Moini [۸] گزارش کردند که با افزایش غلظت محلول اسمزی و دما، بافت میوه خشک شده نرم تر شده و بیشینه نیروی لازم برای فشردن نمونه در آزمون بافت (حداکثر نیروی فشاری) کاهش می یابد. این کاهش می تواند ناشی از تخریب نسبی ساختار سلولی و نرم شدن بافت در اثر شرایط شدیدتر فرآیند، از جمله دمای بالاتر و افزایش انتقال جرم باشد.

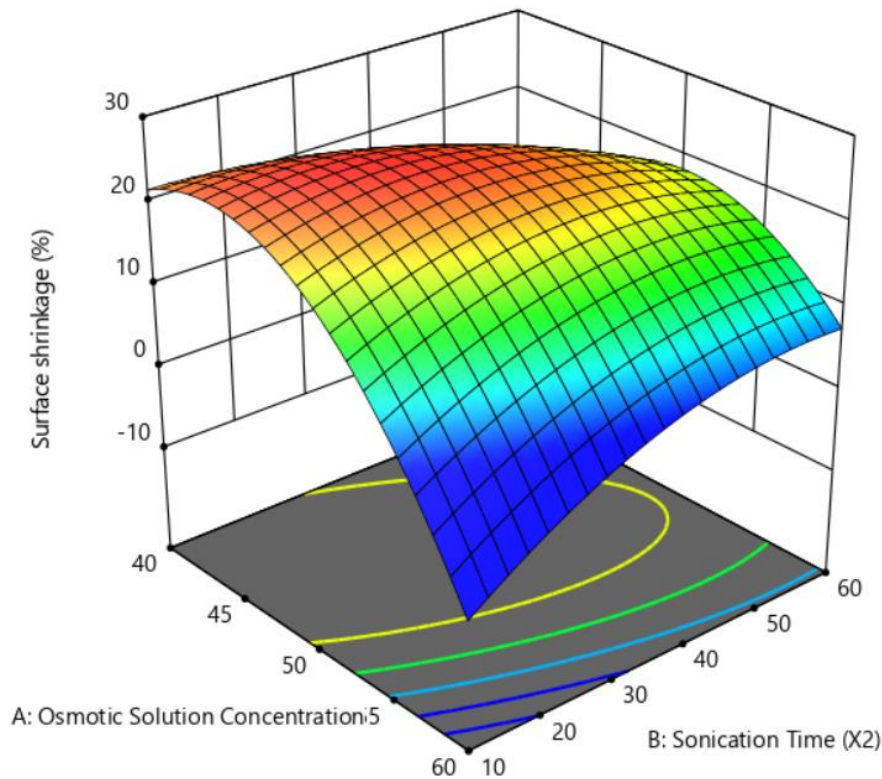
### ۶.۳. چسبندگی

چسبندگی یکی از شاخص‌های مهم بافتی است که بیانگر نیروی منفی یا کار لازم برای غلبه بر جاذبه بین سطح ماده غذایی و سطح در تماس با آن پس از اولین فشردگی و جداسازی می باشد [۶]. این ویژگی با محتوای رطوبت سطحی، میزان مواد محلول آزاد و ساختار ریزسطحی محصول ارتباط مستقیم دارد. نتایج پژوهش نشان داد که چسبندگی نمونه‌ها بین ۰/۰۰۸ تا ۰/۵۳۶ گرم نیروی ثانیه متغیر بود. آنالیز واریانس نتایج نیز نشان داد که هیچ کدام از متغیرهای مستقل (مدت زمان فراصوت و غلظت محلول اسمزی) تأثیر معنی داری بر چسبندگی نمونه‌ها نداشتند. این عدم تغییر معنی دار از چند منظر قابل تبیین است: اول، چسبندگی به شدت به میزان رطوبت سطحی آزاد وابسته است. زمانی که خشک کردن نهایی محتوای رطوبت را به سطحی پایین و یکنواخت کاهش دهد، تفاوت‌های ناشی از شدت پیش تیمار یا غلظت محلول اسمزی بر رطوبت سطحی بی اثر می شود [۵]. دوم، تیمار

فراصوت و تغییرات غلظت محلول اسمزی باعث تغییرات داخلی بافت (افزایش تخلخل یا تشکیل ریزکانال‌ها) می‌شوند، اما این تغییرات لزوماً به خروج مواد سطحی چسبناک منجر نمی‌شوند، به‌ویژه هنگامی که محصول پس از خشک‌کردن دارای پوشش مواد جامد نفوذی باشد [۴]. Fernandes, Gallão and Rodrigues [۶] نشان دادند که فراصوت عمدتاً ساختار داخلی بافت را تغییر می‌دهد و تأثیر آن بر ویژگی‌های سطحی محدودتر است. سوم، اگر ترکیبات اصلی تعیین‌کننده چسبندگی قندهای سطحی یا پلی‌ساکاریدهای محلول باشند، در بازه‌های مورد بررسی تغییرات غلظت محلول اسمزی یا مدت‌زمان فراصوت به‌اندازه‌ای نبوده که تغییر معنی‌دار سطح این ترکیبات را ایجاد کند. مطالعات نشان داده که نفوذ ساکارز به داخل بافت، ترکیب شیمیایی سطح را کمتر از ساختار داخلی تحت تأثیر قرار می‌دهد [۱۵].

### ۷.۳. چروکیدگی سطحی

چروکیدگی سطحی یکی از شاخص‌های کلیدی کیفیت در محصولات میوه‌ای خشک‌شده است که مستقیماً از انقباض ماتریکس ویسکوالاستیک بافت به فضای خالی‌شده توسط آب خارج‌شده از سلول‌ها ناشی می‌شود [۲۳]. این پدیده به‌شدت تحت تأثیر شرایط پیش‌تیمار و فرآیند خشک‌کردن قرار دارد و با پارامترهایی مانند تخلخل و دانسیته مرتبط است [۲۴]. نتایج پژوهش نشان داد که چروکیدگی سطحی نمونه‌ها بین ۵ و ۲۵ درصد متغیر بودند. آنالیز واریانس نتایج نشان داد که تنها غلظت محلول اسمزی در سطح اطمینان ۹۵ درصد بر چروکیدگی سطحی نمونه‌ها معنی‌دار بود و مدت‌زمان فراصوت هیچگونه اثر آماری معنی‌داری بر چروکیدگی سطحی نمونه‌ها نداشت. شکل ۵ تأثیر غلظت محلول اسمزی و مدت‌زمان فراصوت بر چروکیدگی سطحی نمونه‌ها را با توجه به معادله ۵ (جدول ۲) نشان می‌دهد.



شکل (۵). تأثیر غلظت محلول اسمزی و مدت‌زمان فراصوت بر چروکیدگی سطحی نمونه‌های سیب

Fig 5. Effect of osmotic solution concentration and sonication time on surface shrinkage of apple samples

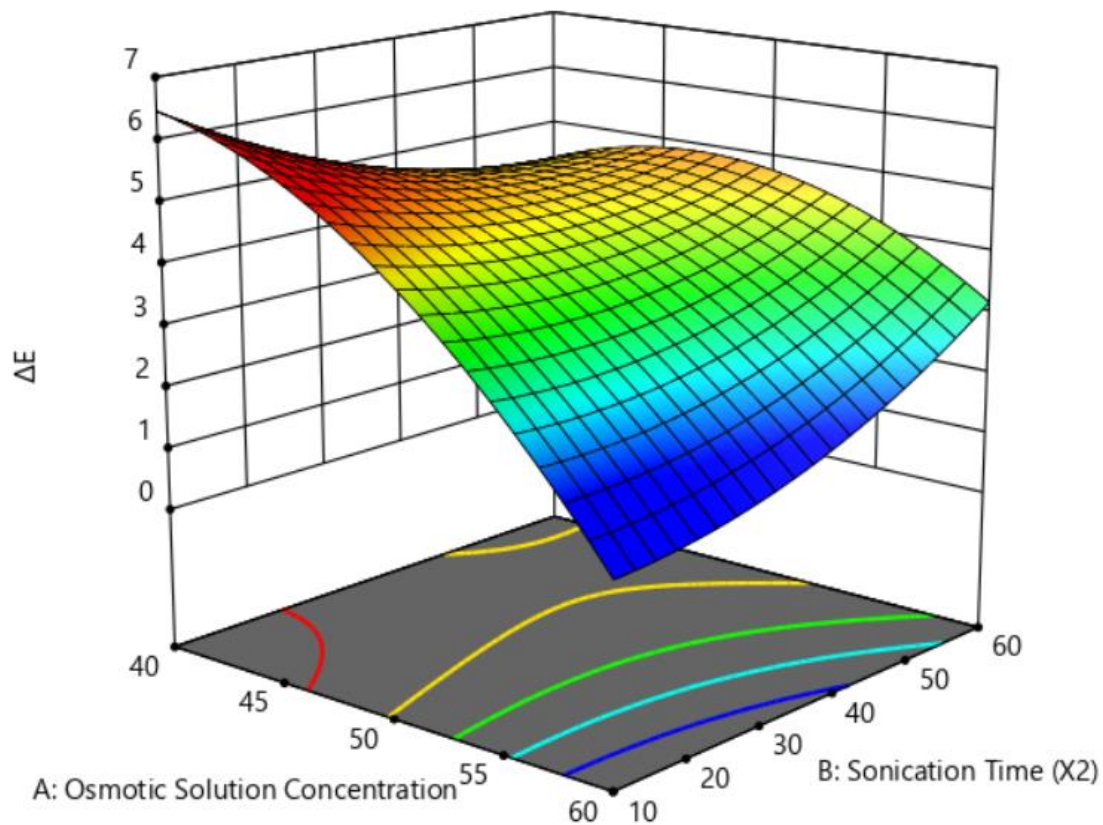
همانطور که شکل ۵ قابل مشاهده است غلظت محلول اسمزی نقش غالب تری در تغییرات چروکیدگی سطحی نسبت به مدت زمان فراصوت دارد؛ به طوری که با افزایش غلظت از ۴۰ به ۶۰ درصد، میزان چروکیدگی کاهش می یابد، در حالی که تغییرات زمان فراصوت اثر معنی داری ندارد. کاهش چروکیدگی با افزایش غلظت محلول اسمزی به افزایش نیروی محرکه اسمزی و در نتیجه خروج مؤثرتر آب همراه با نفوذ مواد جامد محلول به درون ساختار سلولی نسبت داده می شود. گزارش شده است که در محلول های با غلظت بالاتر، نفوذ ساکارز به فضای بین سلولی موجب تثبیت ساختار بافت و افزایش مقاومت دیواره های سلولی در برابر تنش های ناشی از خشک کردن می شود که نهایتاً از فروپاشی ریزساختار جلوگیری کرده و چروکیدگی را کاهش می دهد [۴]. این پدیده با حفظ نسبی تورژسانس سلولی همراه است که نقش مهمی در محدود کردن انقباض حجمی طی مراحل بعدی خشک کردن ایفا می کند [۲۵]. عدم تأثیر معنی دار مدت زمان فراصوت بر میزان چروکیدگی در محدوده بررسی شده می تواند به این دلیل باشد که تغییرات ساختاری ناشی از امواج فراصوت در زمان های اولیه تقریباً کامل شده و در زمان های طولانی تر اثرات اضافی قابل توجهی ایجاد نمی کند. به عبارت دیگر، پس از یک بازه مشخص، تخریب دیواره های سلولی و تشکیل کانال های میکروسکوپی به حالت اشباع رسیده و ادامه تیمار فراصوت تأثیر چشمگیری بر چروکیدگی نمونه ندارد.

مطالعات نشان داده اند که بیشترین اثرات فراصوت از جمله افزایش نفوذپذیری غشای سلولی و تقویت انتقال جرم به واسطه پدیده کایتاسیون در زمان های کوتاه تر اعمال امواج فراصوت ایجاد می شود. به بیان دیگر، بخش عمده تغییرات ساختاری ناشی از فراصوت در همان دقایق ابتدایی تیمار اتفاق می افتد و با افزایش بیشتر مدت زمان تیمار، میزان تغییرات اضافی محدود می شود [۲۶]. Fernandes, Gallão and Rodrigues [۶] با مطالعه تغییرات ساختار سلولی طالبی نشان دادند که فراصوت باعث بهبود انتقال جرم می گردد، اما این اثرات در زمان های طولانی تر لزوماً تشدید نمی شوند.

### ۸.۳. رنگ (تغییر رنگ کلی)

تغییر رنگ کلی یکی از مهم ترین شاخص های کیفیت ظاهری محصولات خشک شده به ویژه میوه هایی مانند سیب محسوب می شود، زیرا رنگ به عنوان اولین ویژگی حسی، نقش تعیین کننده ای در پذیرش مصرف کننده دارد.

نتایج پژوهش نشان داد که تغییر رنگ کلی نمونه ها بین ۱/۸ و ۵/۴ متغیر بودند. آنالیز واریانس نتایج نیز نشان داد که تنها غلظت محلول اسمزی در سطح اطمینان ۹۵ درصد بر تغییر رنگ کلی معنی دار بود و مدت زمان فراصوت هیچگونه اثر آماری معنی داری بر تغییر رنگ کلی نمونه ها نداشت. شکل ۶ تأثیر غلظت محلول اسمزی و مدت زمان فراصوت بر تغییر رنگ کلی نمونه ها را با توجه به معادله ۶ (جدول ۲) نشان می دهد.



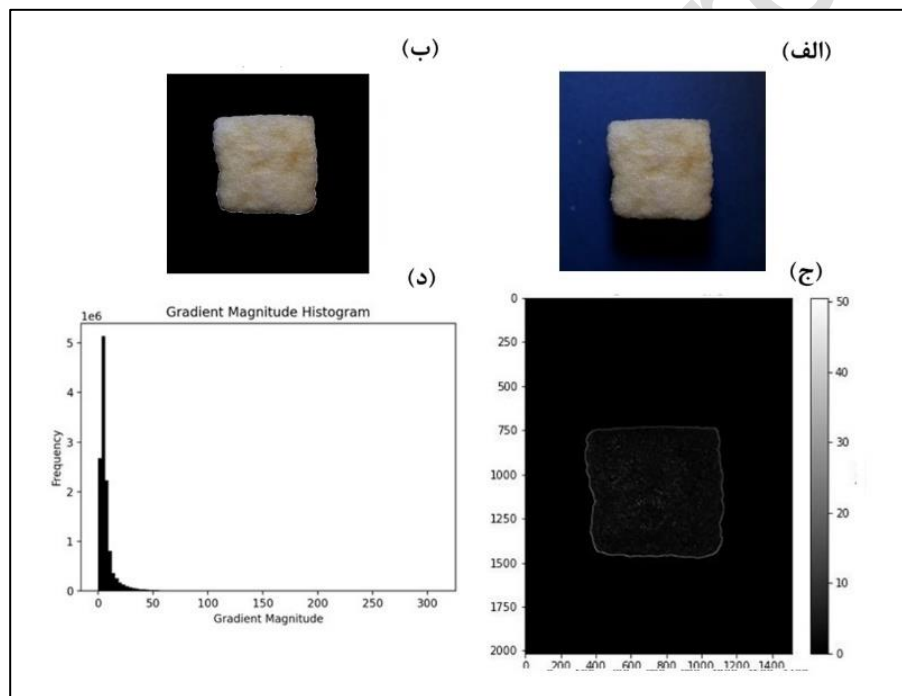
شکل (۶). تأثیر غلظت محلول اسمزی و مدت زمان فراصوت بر تغییر رنگ کلی نمونه‌های سیب  
**Fig 6.** Effect of osmotic solution concentration and sonication time on overall color change of apple samples

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت محلول اسمزی از ۴۰ به ۶۰ درصد، میزان تغییر رنگ کلی نمونه‌ها کاهش می‌یابد در حالی که تغییرات مدت‌زمان فراصوت اثر معنی‌داری بر این شاخص ندارد. کاهش  $\Delta E$  در غلظت‌های بالاتر محلول اسمزی به چند مکانیزم مکمل نسبت داده می‌شود. نخست، افزایش غلظت محلول اسمزی منجر به خروج سریع‌تر آب از بافت و هم‌زمان نفوذ مواد جامد محلول به فضای بین‌سلولی می‌شود. این امر با کاهش فعالیت آب و محدود شدن دسترسی اکسیژن، شدت واکنش‌های قهوه‌ای‌شدن آنزیمی و غیرآنزیمی را کاهش می‌دهد [۴]. علاوه بر این، حضور مواد جامد اسمزی در بافت می‌تواند نقش محافظتی در برابر تخریب رنگ‌دانه‌ها و اکسیداسیون ترکیبات فنولی ایفا کرده و به پایداری رنگ در طی مراحل بعدی خشک‌کردن کمک کند [۵]. در مقابل، عدم تأثیر معنی‌دار مدت‌زمان فراصوت بر  $\Delta E$  نشان می‌دهد که اثرات مثبت فراصوت بر کنترل تغییرات رنگی عمدتاً به مراحل اولیه تیمار محدود می‌شود. فراصوت با ایجاد کاویتاسیون می‌تواند نفوذپذیری غشای سلولی را افزایش داده و انتقال جرم را تسهیل کند [۶]، اما افزایش بیش از یک حد مشخص در زمان فراصوت لزوماً منجر به بهبود بیشتر کیفیت رنگ نمی‌شود.

## ۹.۳. طول و چگالی لبه

تحلیل لبه‌های سطحی یکی از روش‌های مؤثر در ارزیابی کمی ویژگی‌های ساختاری محصولات غذایی خشک‌شده است. لبه‌ها به‌عنوان مرزهای بین نواحی با تغییرات شدید شدت روشنایی، نشان‌دهنده ناپیوستگی‌های ساختاری نظیر ترک‌ها، شیارها و چین‌خوردگی‌ها در سطح نمونه هستند. پارامتر طول لبه بیانگر مجموع طول این ناپیوستگی‌ها بوده و افزایش آن حاکی از وجود ترک‌های بیشتر یا طولی‌تر ناشی از تنش‌های مکانیکی و انقباض در طول خشک‌کردن است. چگالی لبه نیز تراکم این ناپیوستگی‌ها در واحد سطح را نشان داده و مقادیر بالاتر آن بیانگر سطح ناهموارتر با پیچیدگی بافتی بیشتر است [۲۶].

در این پژوهش به‌منظور کمی‌سازی ناپیوستگی‌های ساختاری سطح نمونه‌های سیب خشک‌شده، الگوریتم تشخیص لبه Canny به‌کار گرفته شد. شکل ۷ یک نمایش چهارپنلی از تحلیل لبه و گرادیان تصویر نمونه سیب خشک مربوط به نمونه شماره ۲ (جدول ۱؛ غلظت محلول اسمزی ۴۰ درصد و مدت زمان پیش‌تیمار فراصوت ۶۰ دقیقه) را ارائه می‌دهد. این چارچوب تحلیلی به‌منظور استخراج پارامترهای کمی مرتبط با زبری و ناهمواری سطح کلیه نمونه‌ها (جدول ۱) به‌کار گرفته شد و به‌صورت یکسان برای تمامی تصاویر مورد مطالعه محاسبه و اعمال گردید. بدین ترتیب، شاخص‌های مبتنی بر لبه و گرادیان به‌عنوان توصیف‌گرهای عینی تغییرات ریزساختاری سطح نمونه‌ها در شرایط مختلف فرایندی مورد استفاده قرار گرفتند.



شکل (۷). نمایش چهاربخشی تحلیل لبه و گرادیان تصویر نمونه سیب خشک نمونه شماره ۲: (الف) تصویر رنگی اولیه نمونه؛ (ب) تصویر قطعه‌بندی‌شده

حاصل از آستانه‌گذاری بر نقشه بزرگی گرادیان؛ (ج) نقشه بزرگی گرادیان محاسبه‌شده با استفاده از عملگر سوبل؛ (د) هیستوگرام توزیع بزرگی گرادیان

**Fig 7.** Four-part display of edge analysis and gradient image of freeze-dried apple sample no. 2: (a) initial color image of the sample; (b) segmented image obtained by thresholding on the gradient map; (c) gradient map calculated using the sobel operator; (d) histogram of gradient magnitude distribution

مطابق شکل ۷ (الف) تصویر رنگی نمونه سیب خشک نمونه ۲ را نشان می‌دهد که به‌عنوان مبنای انجام پردازش‌های تصویری مورد استفاده قرار گرفت. در شکل ۷ (ب)، تصویر قطعه‌بندی‌شده حاصل از آستانه‌گذاری بر روی نقشه بزرگی گرادیان ارائه شده است که در آن، لبه‌های اصلی نمونه به‌طور مؤثری از پس‌زمینه و نواحی نسبتاً یکنواخت سطح تفکیک شده‌اند. شکل ۷ (ج) نیز نقشه بزرگی گرادیان محاسبه‌شده با استفاده از عملگر سوبل را نمایش می‌دهد. این نقشه میزان تغییرات مکانی شدت روشنایی را در هر پیکسل مشخص می‌کند، به‌طوری‌که نواحی روشن‌تر بیانگر تغییرات شدیدتر شدت و در نتیجه حضور لبه‌ها، ترک‌ها و ناپیوستگی‌های

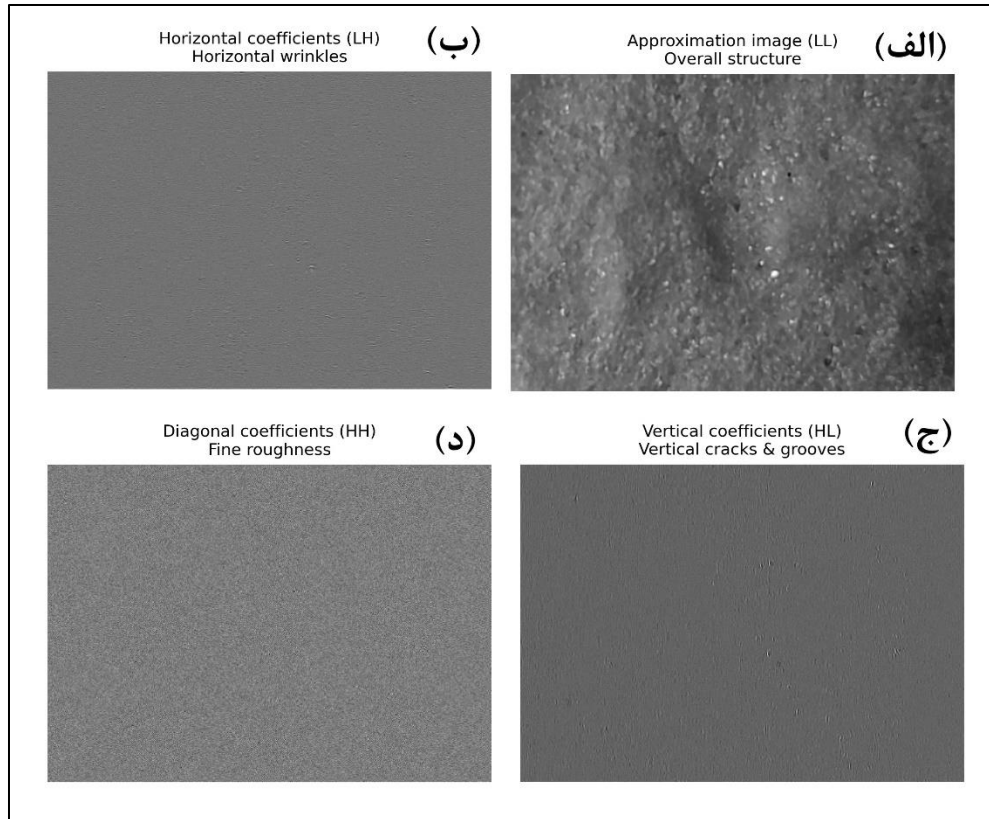
ساختاری سطح نمونه هستند. علاوه بر این، شکل ۷ (د) هیستوگرام توزیع بزرگی گرادیان را نشان می‌دهد که الگوی چوله به راست را آشکار می‌سازد؛ به این معنا که بخش عمده‌ای از پیکسل‌ها دارای مقادیر گرادیان پایین (نواحی صاف و یکنواخت) بوده و تنها درصد محدودی از پیکسل‌ها مقادیر گرادیان بالا (مرتبط با لبه‌ها و ترک‌ها) را شامل می‌شوند. از این توزیع آماری برای تعیین آستانه‌های هیستریزیس بهینه در الگوریتم تشخیص لبه Canny استفاده شد تا استخراج لبه‌ها با حداقل نویز و بیشترین دقت ساختاری انجام گیرد. در این پژوهش در ادامه، کانتور خارجی نمونه استخراج گردید و دو پارامتر طول لبه و چگالی لبه محاسبه شدند که به عنوان شاخص‌های غیرمخرب برای ارزیابی کیفیت ظاهری و یکپارچگی ساختاری سطح محصولات خشک‌شده کاربرد دارند.

نتایج آنالیز واریانس نیز نشان داد که غلظت محلول اسمزی تأثیر معنی‌داری بر پارامترهای طول لبه و چگالی لبه داشت؛ به گونه‌ای که با افزایش غلظت از ۴۰ به ۶۰ درصد، هر دو پارامتر کاهش یافتند. این کاهش به نفوذ مولکول‌های ساکارز به فضاهای بین سلولی و پرشدن ترک‌ها و شیارهای سطحی نسبت داده می‌شود. در غلظت‌های بالاتر، ساکارز به‌عنوان عامل پرکننده عمل کرده و ناپیوستگی‌های ساختاری سطح را کاهش می‌دهد [۴]. همچنین، خروج تدریجی آب همراه با نفوذ هم‌زمان مواد جامد محلول، انقباض یکنواخت‌تر بافت را فراهم ساخته و از تشکیل ترک‌های جدید جلوگیری می‌کند. همچنین مدت‌زمان فراصوت اثر معنی‌داری بر طول لبه و چگالی لبه نداشت. این یافته حاکی از آن است که اگرچه فراصوت از طریق کاویتاسیون آکوستیک میکروکانال‌هایی در بافت ایجاد می‌کند، اما این تغییرات عمدتاً در عمق بافت متمرکز بوده و تأثیر محسوسی بر ویژگی‌های سطحی ندارند [۲۶]. Fernandes, Gallão and Rodrigues [۶] نیز با مطالعه ساختار سلولی طالبی نشان دادند که مکانیزم عمل پیش‌تیمار فراصوت (جذب آب توسط بافت) با پیش‌تیمار اسمزی (خروج آب از بافت) متفاوت است، که این تفاوت می‌تواند دلیل عدم تأثیر فراصوت بر پارامترهای لبه سطحی باشد.

### ۱۰.۳. تحلیل بافت سطحی به روش تبدیل موجک

تبدیل موجک گسسته دوبعدی (2D-DWT) از ابزارهای کارآمد در تحلیل بافت تصاویر مواد غذایی است که امکان استخراج اطلاعات چندمقیاسی از ساختار سطحی نمونه‌ها را فراهم می‌سازد [۲۷]. این تبدیل، تصویر را به چهار زیرباند تجزیه می‌کند که هر یک جنبه متفاوتی از ویژگی‌های بافتی را توصیف می‌کنند. زیرباند تقریب (LL) شامل اطلاعات فرکانس پایین بوده و نمایانگر ساختار کلی و یکنواختی سطح است؛ تغییرات این زیرباند می‌تواند بیانگر میزان چروکیدگی و انقباض بافت در اثر خشک‌کردن باشد [۹]. زیرباندهای جزئیات افقی (LH) و عمودی (HL) به ترتیب لبه‌ها و ناپیوستگی‌های بافت را در جهات مربوطه آشکار می‌سازند و افزایش مقادیر آن‌ها حاکی از وجود ترک‌ها و شیارهای جهت‌دار است. زیرباند جزئیات قطری (HH) که حساس‌ترین زیرباند به تغییرات ریز بافت محسوب می‌شود، جزئیات ظریف و زبری سطحی را منعکس کرده و مقادیر بالاتر آن نشان‌دهنده بافت ناهمگن‌تر است [۲۸].

شکل ۸ چهار زیرباند حاصل از تبدیل موجک برای نمونه شماره ۲ را نمایش می‌دهد: شکل ۸ (الف) تصویر LL ساختار کلی سطح، (ب) تصویر LH چین‌خوردگی‌های افقی، (ج) تصویر HL ترک‌های عمودی و (د) تصویر HH زبری و جزئیات ریز بافت را نشان می‌دهد. میانگین قدرمطلق ضرایب هر زیرباند به‌عنوان شاخص کمی استخراج گردید تا اثر غلظت محلول اسمزی، مدت‌زمان آبیگری و مدت‌زمان پیش‌تیمار فراصوت بر ویژگی‌های بافتی سطح نمونه‌های سیب خشک‌شده بررسی شود.



شکل (۸). نمایش زیرباند‌های تبدیل موجک گسسته دوبعدی برای نمونه سیب خشک‌شده به روش انجمادی: (الف) زیرباند تقریب (LL)، (ب) زیرباند جزئیات عمودی (HL)، (ج) زیرباند جزئیات افقی (LH) و (د) زیرباند جزئیات قطری (HH)

**Fig 8.** Display of two-dimensional discrete wavelet coefficients for freeze-dried apple samples: (a) Approximation sub-band (LL), (b) Horizontal detail Sub-band (HL), (c) Vertical detail sub-band (LH), and (d) Diagonal detail sub-band (HH)

نتایج آنالیز واریانس نشان داد که چهار زیرباند تبدیل موجک، الگوهای پاسخ متفاوتی به غلظت محلول اسمزی و مدت زمان پیش تیمار فراصوت دارند. مطابق نتایج پژوهش هر دو متغیر غلظت محلول اسمزی و مدت زمان فراصوت بر زیرباند تقریب (LL) و زیرباند جزئیات عمودی (HL) در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی دار بودند. به طوری که در زیرباند LL، افزایش غلظت محلول اسمزی اثر کاهشی غیرخطی و افزایش زمان فراصوت اثر افزایشی غیرخطی داشت و در زیرباند HL هر دو متغیر اثر افزایشی خطی نشان دادند. همچنین نتایج پژوهش نشان داد که زیرباند جزئیات قطری (HH) تنها تحت تأثیر معنی دار غلظت محلول اسمزی در سطح ۹۵ درصد قرار گرفت و افزایش غلظت باعث کاهش آن شد. همچنین هیچ یک از متغیرهای غلظت محلول اسمزی و مدت زمان فراصوت بر زیرباند جزئیات افقی (LH) اثر معنی داری نداشت.

افزایش غلظت محلول اسمزی با ایجاد گرادیان فشار اسمزی بالاتر، خروج آب از سلول‌ها را تسریع کرده و منجر به انقباض سلولی و چروکیدگی دیواره‌ها می‌شود [۴]. همزمان، نفوذ ساکارز به فضاهای بین سلولی با پر کردن حفرات ریز، زبری میکروسکوپی سطح را کاهش می‌دهد. در مقابل، پیش تیمار فراصوت از طریق کاپیتاسیون آکوستیک باعث ایجاد میکروکانال‌ها و منافذی با جهت گیری غالب در راستای انتشار امواج شده و انتقال جرم را بهبود می‌بخشد [۲۶]. زیرباند LL که بیانگر ساختار کلی تصویر است، با افزایش غلظت محلول اسمزی روند کاهشی غیرخطی نشان داد که به انقباض سلولی و نزدیک شدن بافت به اشباع تغییرات ساختاری نسبت داده می‌شود [۲۶]. فراصوت اثر افزایشی ملایمی بر این زیرباند داشت که نشان دهنده حفظ بهتر یکنواختی سطح در اثر کاهش انقباض نامتقارن است. همچنین مطابق نتایج پژوهش زیرباند HL افزایش خطی معنی داری با افزایش هر دو متغیر نشان داد که بیانگر تشدید لبه‌ها و ناهمگنی‌های عمودی است. این رفتار ناشی از انقباض نامتقارن سلول‌ها در اثر آبیگری اسمزی و ایجاد

میکروکانال‌های عمودی توسط فراصوت است. خطی بودن این روند حاکی از آن است که بافت در محدوده مورد بررسی هنوز به اشباع تغییرات ریزساختاری نرسیده است. زیرباند HH با افزایش غلظت محلول اسمزی کاهش معنی‌دار یافت که به صاف‌تر شدن ریزساختار سطح در اثر نفوذ ساکارز و پر شدن حفرات ریز نسبت داده می‌شود [۴]. عدم تأثیر معنی‌دار مدت زمان فراصوت بر این زیرباند می‌تواند به غالب بودن تغییرات فراصوت در مقیاس مزوسکوپی و تمرکز اثرات آن در عمق بافت مربوط باشد [۲۶]. زیرباند LH به هیچ‌یک از متغیرها پاسخ معنی‌داری نشان نداد. این رفتار به یکنواختی کلی ریزساختار بافت سیب و فقدان جهت‌گیری ترجیحی در آرایش سلول‌ها نسبت داده می‌شود. همچنین، تغییرات القاشده توسط فرایند اسمز و فراصوت عمدتاً جهت‌گیری عمودی دارند و ماهیت خشک‌کردن انجمادی با تنش‌های ملایم‌تر و کم‌جهت‌تر همراه است [۴].

### ۱۱.۳. بهینه‌سازی عددی

در این روش با استفاده از مدل‌هایی که برای هر پاسخ به دست آمده است، مقادیر بهینه متغیرهای مستقل توسط نرم‌افزار دیزاین اکسپرت محاسبه شد. در این حالت در صورتی که اهمیت صفات با هم متفاوت باشد می‌توان به ترتیب اهمیت، به آن‌ها ضریب وزنی و یا در بازه مورد نظر قرار داد. بر این اساس در این پژوهش کاهش وزن بعد از آبیگری اسمزی و خشک کردن، جذب مجدد آب و سختی حداکثر و چروکیدگی سطحی و تغییر رنگ کلی حداقل در نظر گرفته شدند. نقطه بهینه فرآیند با توجه به صفات مذکور، غلظت محلول اسمزی ۵۸ درصد و مدت زمان فراصوت ۱۸ دقیقه به دست آمد. چنین فرآیندی دارای کاهش وزن پس از آبیگری اسمزی ۴/۷ درصد و کاهش وزن پس از خشک کردن ۷۸ درصد، جذب مجدد آب ۷۲/۶ درصد و سختی ۱۵۴۸۴ گرم نیرو، چروکیدگی سطحی ۳/۷، تغییر رنگ کلی ۱/۸ و میزان رضایت‌مندی<sup>۱</sup> ۰/۷۱ خواهد بود.

### ۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر پیش‌تیمار ترکیبی فراصوت-آبیگری اسمزی بر ویژگی‌های کیفی و بافت سطحی برش‌های سیب خشک‌شده انجمادی با استفاده از روش سطح پاسخ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که غلظت محلول اسمزی نقش غالب و تعیین‌کننده‌ای در بهبود اکثر ویژگی‌های کیفی محصول نهایی ایفا می‌کند. افزایش غلظت محلول اسمزی به‌طور معنی‌داری موجب افزایش افت وزن، کاهش قابلیت بازجذب آب، کاهش شاخص تغییرات کلی رنگ، کاهش میزان چروکیدگی سطحی و کاهش پارامترهای تحلیل لبه گردید. این بهبود کیفیت به نفوذ ساکارز به فضاهای بین‌سلولی و ایجاد ماتریکس محافظ نسبت داده می‌شود. در مقابل، پیش‌تیمار فراصوت تأثیراتی را بر ویژگی‌های فیزیکی و ظاهری داشت، که به‌طور مشخص سبب کاهش سختی بافت گردید که به اثرات مکانیکی پدیده کاویتاسیون شامل تخریب جزئی دیواره‌های سلولی نسبت داده می‌شود. تحلیل تبدیل مویک گسسته دوبعدی نیز نشان داد که زیرباندهای LL و HL تحت تأثیر هر دو متغیر، زیرباند HH تنها تحت تأثیر غلظت محلول اسمزی و زیرباند LH بدون تغییر معنی‌دار بودند. همچنین بر اساس بهینه‌سازی عددی انجام‌شده، شرایط پیش‌تیمار با غلظت محلول اسمزی حدود ۵۸ درصد و مدت زمان فراصوت ۱۸ دقیقه، مناسب‌ترین تعادل بین حفظ کیفیت ظاهری، بافتی و کارایی فرآیند را فراهم می‌آورد. به‌طور کلی، ترکیب پیش‌تیمار فراصوت با آبیگری اسمزی می‌تواند به‌عنوان یک استراتژی مؤثر برای بهبود کیفیت برش‌های سیب خشک‌شده انجمادی مورد استفاده قرار گیرد، به‌طوری‌که غلظت محلول اسمزی بهبود ویژگی‌های ظاهری و فیزیکی را تضمین نموده و فراصوت با کاهش سختی بافت، قابلیت مصرف و پذیرش مصرف‌کننده را افزایش می‌دهد.

<sup>1</sup> Desirability

- [1] Mujumdar, A.S. (2006) *Handbook of industrial drying* CRC press
- [2] Ciużyńska, A. & Lenart, A. (2011) Freeze-drying-application in food processing and biotechnology-a review. *Polish journal of food and nutrition sciences* 61, 165-171
- [3] Torreggiani, D. (1993) Osmotic dehydration in fruit and vegetable processing. *Food Research International* 26, 59-68
- [4] Lewicki, P.P. & Porzecka-Pawlak, R. (2005) Effect of osmotic dewatering on apple tissue structure. *Journal of Food Engineering* 66, 43-50
- [5] Mierzwa, D. & Kowalski, S.J. (2016) Ultrasound-assisted osmotic dehydration and convective drying of apples: Process kinetics and quality issues. *Chemical and Process Engineering* 37, 1-12
- [6] Fernandes, F.A., Gallão, M.I. & Rodrigues, S. (2008) Effect of osmotic dehydration and ultrasound pretreatment on cell structure: Melon dehydration. *LWT-Food Science and Technology* 41, 604-610
- [7] Cárcel, J. et al. (2007) Influence of ultrasound intensity on mass transfer in apple immersed in a sucrose solution. *Journal of food engineering* 78, 472-479
- [8] Shamaei, S., Emam-Djomeh, Z. & Moini, S. (2012) Ultrasound-assisted osmotic dehydration of cranberries: Effect of finish drying methods and ultrasonic frequency on textural properties. *Journal of texture studies* 43, 133-141
- [9] Zheng, C., Sun, D.-W. & Zheng, L. (2006) Recent developments and applications of image features for food quality evaluation and inspection—a review. *Trends in Food Science & Technology* 17, 642-655
- [10] Kashaninejad, M. & Razavi, S.M.A. (2020) Influence of thermosonication treatment on the average size of fat globules, emulsion stability, rheological properties and color of camel milk cream. *Lwt* 132, 109852
- [11] Vega-Gálvez, A. et al. (2012) Effect of temperature and air velocity on drying kinetics, antioxidant capacity, total phenolic content, colour, texture and microstructure of apple (var. Granny Smith) slices. *Food chemistry* 132, 51-59
- [12] Kashaninejad, M. & Mohebbi, M. (2018) Detecting Adulteration in Camel Milk Using Color Change Modeling by Image Processing and Mixture-process Variable Experiment. *Research and Innovation in Food Science and Technology* 7, 89-104
- [13] Batchelor, B., Hill, D. & Hodgson, H. (1984) Automated visual inspection .
- [14] Singh, C.B. et al. (2010) Wavelet analysis of signals in agriculture and food quality inspection. *Food and Bioprocess Technology* 3, 2-12
- [15] Rastogi, N.-K. et al. (2002) Recent developments in osmotic dehydration: methods to enhance mass transfer. *Trends in Food Science & Technology* 13, 48-59
- [16] Simal, S. et al. (1998) Use of ultrasound to increase mass transport rates during osmotic dehydration. *Journal of Food engineering* 36, 323-336
- [17] Rastogi, N., Raghavarao, K. & Niranjana, K. (2005) Developments in osmotic dehydration. In *Emerging technologies for food processing*, pp. 219-221. Elsevier
- [18] Garcia-Noguera, J. et al. (2010) Ultrasound-assisted osmotic dehydration of strawberries: effect of pretreatment time and ultrasonic frequency. *Drying Technology* 28, 294-303
- [19] Rastogi, N., Raghavarao, K. & Niranjana, K. (1997) Mass transfer during osmotic dehydration of banana: Fickian diffusion in cylindrical configuration. *Journal of food engineering* 31, 423-432
- [20] Tomasz, H. et al. (2025) The Effect of Pre-Treatment on the Rehydration of Dried Apple Cube. *Applied Sciences* 15, 1377
- [21] Górnicki, K., Choińska, A. & Kaleta, A. (2020) Effect of variety on rehydration characteristics of dried apples. *Processes* 8, 1454
- [22] Yitayew, T. & Fenta, T. (2020). The Effect of Drying Method on the Texture, Color, Vitamin C and  $\beta$ -Carotene Content of Dried Mango Slices (Cv. Apple and Kent). International Conference on Advances of Science and Technology. Springer
- [23] Aguilera, J.M. (2003) Drying and dried products under the microscope. *Food Science and Technology International* 9, 137-143

- [24] Krokida, M. & Maroulis, Z. (1997) Effect of drying method on shrinkage and porosity. *Drying technology* 15, 2441-2458
- [25] Tortoe, C. (2010) A review of osmodehydration for food industry .
- [26] Fernandez, L., Castellero, C. & Aguilera, J. (2005) An application of image analysis to dehydration of apple discs. *Journal of food engineering* 67, 185-193
- [27] Bharati, M.H., Liu, J.J. & MacGregor, J.F. (2004) Image texture analysis: methods and comparisons. *Chemometrics and intelligent laboratory systems* 72, 57-71
- [28] Quevedo, R. *et al.* (2002) Description of food surfaces and microstructural changes using fractal image texture analysis. *Journal of food engineering* 53, 361-371

## Effect of Combined Osmotic–Ultrasound Pretreatment on Physical Properties and Surface Microstructure of Freeze-Dried Apple Cubes Using a Two-Dimensional Wavelet Transform Approach

Samira Baratian Ghorghi<sup>a</sup>, Morteza Kashaninejad<sup>b\*,1</sup>, Mohsen Heydari<sup>b</sup>, Khashayar Sarabandi<sup>c</sup>, Alireza Vasiee<sup>d</sup>

1. PhD student in Food Engineering, Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad (FUM), Mashhad, Iran
2. Assistant Professor, Department of Green Technologies in Food Processing, Research Institute of Food Science and Technology (RIFST), Mashhad, Iran
3. Assistant Professor, Department of Food Chemistry, Research Institute of Food Science and Technology (RIFST), Mashhad, Iran
4. Assistant Professor, Department of Food Safety and Quality Control, Research Institute of Food Science and Technology (RIFST), Mashhad, Iran

### Abstract

Osmotic solution concentration and ultrasonic pretreatment duration are crucial parameters influencing process efficiency and product quality in freeze-drying. Investigating the combined effect of these factors on the physicochemical properties of freeze-dried fruit is therefore essential. This study evaluated the impact of varying sucrose solution concentrations (40-60 wt%) and ultrasonic pretreatment times (10-50 min) on several characteristics of freeze dried apple cubes, including water loss after osmotic dehydration, weight loss after drying, water absorption capacity, textural properties (hardness and adhesiveness), overall color change ( $\Delta E$ ), surface shrinkage, edge parameters (EL and ED), and two-dimensional wavelet transform coefficients (LL, LH, HL, and HH). Response Surface Methodology (RSM) analysis revealed that increasing osmotic concentration significantly reduced surface shrinkage, overall color change, and edge parameters. Ultrasonic pretreatment duration significantly decreased hardness, while adhesiveness was unaffected by either variable. Wavelet analysis indicated that LL and

---

\*Corresponding author: Mortazakashaninejad@gmail.com

HL subbands were significantly responsive to both factors, HH responded only to osmotic concentration, and LH showed no significant response. Overall, osmotic solution concentration played a dominant role in preserving visual quality and surface microstructure, whereas ultrasonic pretreatment primarily affected textural properties. The combined application of these two pretreatments may therefore improve several quality attributes of freeze dried apples simultaneously.

**Keywords:** Freeze-drying, Ultrasonication, Osmotic Dehydration, Image Processing, Wavelet Transform.

Journal Pre-proofs

Journal Pre-proofs