

بهینه‌سازی تولید کف شیر موز و بررسی سینتیک انتقال جرم نمونه بهینه در طی فرایند خشک کردن با هوای داغ

فاطمه پورحاجی*، فریده طباطبایی یزدی^۱، سید علی مرتضوی^۲، محبت محبی^۲، مصطفی مظاهری تهرانی^۲

۱-دانش آموخته ی دکتری، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۲/۰۸

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۰/۱۱

چکیده

در این پژوهش، شرایط بهینه‌یابی تولید کف شیر موز به روش رویه پاسخ بر مبنای سه متغیر سرعت گاز نیتروژن (۲-۰/۲ لیتر بر دقیقه)، میزان صمغ گزانتان (۰/۲۵-۰/۱۵ درصد) و نسبت شیر به موز (۶به۱ و ۳به۱) بررسی گردید. همچنین تأثیر دمای مختلف خشک کن هوای داغ در سه سطح دما ۵۰، ۶۵ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد و دو ضخامت ۳ و ۵ میلی‌متر بر روی نمونه بهینه ارزیابی شد. براساس نتایج مشخص گردید که نمونه حاصل از تأثیر گاز نیتروژن با سرعت ۰/۲ لیتر بر دقیقه، ۰/۲۲ درصد صمغ گزانتان و ۳ درصد موز دارای کمترین دانسیته و بیشترین پایداری، به عنوان نمونه بهینه انتخاب گردید. یافته‌های حاصل از اثر دما و ضخامت بر نمونه بهینه نشان داد که با افزایش دمای خشک کردن، زمان به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافت. به طوری که زمان خشک شدن کف شیر موز با ضخامت ۳ میلی‌متر در دمای ۵۰، ۶۵ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۵۰، ۴۵ و ۴۰ دقیقه و در ضخامت ۵ میلی‌متر به ترتیب ۸۰، ۷۵ و ۶۵ دقیقه بود. علاوه بر این نتایج میانگین ضریب نفوذ کف شیر موز با ضخامت ۳ و ۵ میلی‌متر (در دمای ۵۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد) به ترتیب در محدوده 5×10^{-7} - $1/3 \times 10^{-6}$ و $6/7 \times 10^{-7}$ - $1/6 \times 10^{-6}$ بود. از سوی دیگر میزان انرژی فعال‌سازی ۱۹/۲۳ و ۲۲/۱۳ کیلو ژول بر مول به ترتیب برای کف شیر موز با ضخامت ۳ و ۵ میلی‌متر در دمای ۵۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد گزارش گردید.

واژه های کلیدی: پایداری، شیر موز، ضخامت، ضریب نفوذ، کف پوشی

*مسئول مکاتبات: pourhajif@yahoo.com

۱- مقدمه

موز به عنوان یکی از قدیمی‌ترین و محبوب‌ترین میوه‌ها در جهان به شمار می‌رود. که ارزشمندترین و بیشترین حجم مبادلات تجاری را در بین میوه‌ها در عرصه جهانی به خود اختصاص داده است. این میوه به عنوان یک گیاه علفی و با نام علمی موسی سپانتم^۱ (۱۱). طبق آمار فائو کل تولید جهانی موز در سال ۲۰۱۱ حدود ۱۴۵/۴ میلیون تن بود که به ترتیب هندوستان، اوگاندا و چین با ۲۹/۸، ۱۱/۷ و ۱۰/۷ میلیون تن تولید در رتبه اول تا سوم جهان قرار گرفتند. در حال حاضر در ایران استان سیستان و بلوچستان بیشترین تولید موز را در شرایط آزاد (مزرعه) و استان‌های شمالی کشور بیشترین تولید را در شرایط گلخانه‌ای دارند. براساس آمار موجود به طور متوسط میانگین تولید موز در کشور حدود ۷۰ تن در هکتار برآورد شده است (۱۴). همچنین لازم به ذکر است که این میوه به دلیل دارا بودن پتاسیم، سدیم، منیزیم، ویتامین ث و مقادیر بالایی نشاسته و قند از ارزش تغذیه‌ای مطلوبی برخوردار است (۱۰). با وجود فواید ارزشمند موز و تقاضای بالا، معضلی خاص به لحاظ عمر ماندگاری کوتاه و ضایعات بالا به دلیل فرازگرا بودن (این دسته از میوه‌ها بعد از برداشت دارای یک نقطه بحرانی رشد می‌باشند و سریع به نقطه مرگ سلولی می‌رسند) این میوه پیش روی تولیدکنندگان، واردکنندگان، صادرکنندگان و حتی مصرف‌کنندگان می‌باشد که ذهن محققان صنعت غذا را جهت فرآوری موز و حتی راهکارهایی جهت افزایش عمر انبارمانی آن به خود معطوف کرده است (۱۳). اما باید این نکته را نیز لحاظ نمود که تنها عمر ماندگاری مطرح نیست زیرا تولید و نگهداری آبمیوه و نکتار و حتی مخلوط نمودن آن با شیر فضای بالایی اشغال می‌نماید و هزینه حمل و نقل زیادی را در بردارد. از سوی دیگر نگهداری پالپ میوه‌های فریز شده به دلیل نیاز به استفاده از سردخانه به هزینه زیادی احتیاج دارد. از این رو بهترین راه حل تولید پودر انواع میوه و حتی سبزی و صیفی با در نظر گرفتن مناسب‌ترین روش خشک کردن می‌تواند هزینه حمل و نقل

را کاهش و زمان ماندگاری افزایش دهد (۲۰). در این میان به نظر می‌رسد خشک کردن به روش کف پوشی یک روش نوین و مطلوب برای دستیابی به این مهم باشد. اما باید جهت رسیدن به کمترین میزان دانسیته و بیشترین پایداری کف تلاش نمود. برای افزایش پایداری کف استفاده از پروتئین‌ها توصیه می‌شود. این ترکیبات با افزایش قابلیت کف‌زایی و پایداری کف، خصوصیات سیستم کفی را بهبود می‌بخشند که ارتقاء هر یک از این دو خصوصیت به ویژگی پروتئین بستگی دارد. پروتئین‌ها با ساختار کروی به دلیل آنکه توانایی تشکیل فیلم‌های ویسکوز، الاستیک و به هم پیوسته را دارند، نقش بیشتری در افزایش پایداری کف ایفا می‌کنند (۸). از این رو اولین موردی که جهت تولید یک کف مطلوب و بازارپسند از موز به ذهن می‌رسد، استفاده از پروتئین شیر جهت افزایش پایداری کف است. زیرا در جامعه امروزی شیر موز یک نوشیدنی بسیار لذیذ و پرطرفدار به خصوص در میان کودکان است. اما پروتئین شیر به تنهایی نمی‌تواند به عنوان یک پایدارکننده در کف عمل نماید و حضور یک صمغ در کنار آن می‌تواند بر این مشکل غلبه کند (۲۹) و هر دو (پروتئین شیر و صمغ) در کنار هم پایداری کف را افزایش دهند. همچنین باید سرعت، میزان و فشار گاز ورودی به محفظه خشک‌کن را کنترل نمود زیرا علاوه بر نقشی که در زمان خشک کردن دارد، بر ضریب نفوذ مؤثر است. در راستای خشک کردن به روش کف‌پوشی مطالعات زیادی صورت گرفته است که به برخی مختصراً اشاره می‌گردد. کادام و بالاسوبرامان (۲۰۱۰) به مطالعه خشک کردن کف‌پوشی آب گوجه فرنگی پرداختند. در این مطالعه از آلبومین تخم مرغ در سطوح صفر، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد استفاده گردید. همچنین دمای انتخابی ۶۰، ۶۵ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. نتایج به وضوح نشان داد که حضور ۱۰ درصد آلبومین تخم مرغ و فرآیند هم‌زدن به مدت ۵ دقیقه پایدارترین کف را تولید نمود. همچنین یافته‌های بدست آمده بیانگر آن بود که افزایش سطح عامل کف‌ساز باعث افزایش سرعت خشک‌کردن، گردید (۱۵). همچنین در مطالعه‌ای دیگر فالاده و همکاران (۲۰۱۰) از

[†] *Musa sapientum*

از این رو با توجه به نیاز جامعه در تولید محصولات متنوع، ارزان و با ماندگاری بالا و مطالعات پیشین، در پژوهش پیش رو شرایط بهینه‌سازی تولید کف شیر موز به روش سطح پاسخ مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

موز تازه واریته کاوندیش از بازار محلی مشهد خریداری و به صورت یکجا در دمای یخچال (۴ درجه سانتی‌گراد) نگهداری شد. صمغ گزانتان با نام تجاری Rhodigel™ (Xanthan) Gum (E415) و شیر خشک بدون چربی به ترتیب از شرکت رودیا فرانسه و پالود نیشابور خریداری گردیدند.

۲-۲- آماده‌سازی کف شیر موز

موز تازه پس از پوست‌گیری به قطعات کوچک توسط چاقو به قطر 2×1 میلی‌متر تبدیل شد. جهت جلوگیری از قهوه‌ای شدن آنزیمی نمونه‌ها، عمل آنزیم‌بری با آب در حال جوش (۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) به صورت غوطه‌وری و در مدت زمان ۳ دقیقه انجام گردید. به منظور سرد کردن قطعات موز برش خورده، نمونه‌ها در ظرف حاوی آب ۱۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند (۲۱). در ادامه به منظور تولید پالپ از مخلوط کن خانگی بوش (مدل ۶۰۰w، CNSM30EW، ساخت اسلوانی) با سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه و مدت زمان ۱ دقیقه استفاده شد. پس از تهیه پالپ، نمونه در سطوح مختلف (۳-۶ درصد) با شیر خشک بدون چربی مخلوط و عمل هموژنیزه کردن با توان ۱۰۰۰۰ دور بر دقیقه در مدت زمان ۵ دقیقه انجام گردید. همچنین صمغ گزانتان آماده شده در سطوح ۰/۱۵ و ۰/۲۵ درصد به مخلوط قبلی افزوده گردید. لازم به ذکر است جهت تهیه صمغ گزانتان، ۱ گرم از صمغ با ۱۰۰ میلی‌لیتر آب توسط همزن مغناطیسی آزمایشگاهی مخلوط و به مدت ۲۴ ساعت تا آبگیری کامل در یخچال (۴ درجه سانتی‌گراد) نگهداری گردید. در انتها نمونه به دستگاه کف‌ساز طراحی شده توسط گروه علوم و صنایع غذایی دانشگاه فردوسی مشهد انتقال یافت و دستگاه

امولسیفایر گلیسرول منواسترات در سطوح ۰/۰۰۵، ۰/۰۱، ۰/۰۱۵ و ۰/۰۲ به عنوان عامل کف‌ساز در دمای ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد به منظور تولید پودر موز سبز و موز پخته شده، استفاده نمودند. نتایج نشان داد افزایش غلظت امولسیفایر در کنار افزایش مدت زمان هم‌زدن اثر قابل توجهی در کاهش دانسیته کف داشت. همچنین در این پژوهش مشخص گردید افزایش دمای خشک کردن موجبات کاهش زمان و صرفه‌جویی در آن را فراهم نمود (۹). از سوی دیگر کارلوس و همکاران (۲۰۱۵) در پژوهش خود در زمینه تولید کف شیر، فشار تزریق گاز را عاملی مؤثر تلقی نمودند و به بررسی آن پرداختند. بدین منظور فشار گاز ۱۰۰ و ۲۸۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شد و پارامترهایی از قبیل پایداری و اندازه حباب‌ها ارزیابی گردیدند. نتایج این مطالعه به وضوح نشان داد که با افزایش فشار گاز، پایداری کف کاهش و اندازه حباب‌های گازی افزایش یافت. این محققان علت این امر را چنین توجیه نمودند که با افزایش فشار گاز پارگی و ترکیدن حباب‌های هوا مهیا گردید و به موجب آن دانسیته و پایداری کف کاهش یافت. اما همین محققان در طی پژوهش خود به این نکته دست یافتند که نوع نازل جهت تزریق می‌تواند در کنار فشار و سرعت گاز عاملی مؤثر در خصوصیات فیزیکوشیمیایی کف باشد (۵). مطالعه سینتیک خشک کردن میوه‌ها برای رسیدن به اطلاعاتی درباره زمان مورد نیاز برای خشک کردن بسیار ضروری می‌باشد. بررسی سینتیک خشک کردن، بوسیله عواملی مانند دما و رطوبت نسبی هوا و همچنین محتوای رطوبت میوه تحت تاثیر قرار می‌گیرد (۳۰). با توجه به مطالعات انجام شده، با تجزیه یک فرآیند ترکیبی مانند خشک کردن، به عناصر اصلی آن، به یک سیستم ساده‌تر تبدیل شده که می‌تواند مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد بنابراین اندازه‌گیری خصوصیات خشک-کردن مانند پارامترهای مؤثر در سینتیک خشک کردن لایه نازک می‌تواند در ایجاد دور‌نمایی مناسب برای طراحی تجهیزات صنعتی خشک کردن مورد استفاده قرار گیرد (۱۹).

درجه سانتی گراد) پس از یک ساعت قرائت گردید و به عنوان حجم آب اندازی بر حسب میلی لیتر بیان شد (۲۲).

۲-۴- ضریب نفوذ رطوبت (MR)

ضریب نفوذ مطابق با روش کرانک (۱۹۷۵) براساس قانون فیک و معادله ذیل محاسبه گردید (۷).

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left(-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right)$$

در این رابطه MR نسبت رطوبت، $n=1,2,3,\dots$ عدد صحیح مثبت، t زمان خشک کردن (ثانیه)، D_{eff} ضریب نفوذ موثر (متر مربع بر ثانیه) و L ضخامت کف (متر) بود. لازم به ذکر است در زمان خشک کردن طولانی معادله فوق به صورت زیر ساده می گردد و به صورت مدل لگاریتمی معادله در می آید.

$$\text{رابطه ۳} \quad \ln(MR) = \ln(8/\pi) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right)$$

با رسم نمودار $\ln(MR)$ در برابر زمان خشک کردن یک خط مستقیم با شیب k به دست می آید که از آن برای محاسبه ضریب نفوذ موثر استفاده می گردد.

$$\text{رابطه ۴} \quad K = \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}$$

۲-۵- انرژی فعال سازی (DR)

انرژی فعال سازی با روش آکینار و همکاران (۲۰۰۳) طبق رابطه ۵ و بر حسب معادله آرنیوس محاسبه گردید (۱).

$$\text{رابطه ۵} \quad D_{eff} = D \cdot \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right)$$

D فاکتور آرنیوس (متر مربع بر ثانیه)، E_a انرژی فعال سازی برای نفوذ رطوبت (کیلوژول بر مول)، R ثابت جهانی گازهای ایده آل (کیلوژول بر کیلو مول) و T دمای مطلق بر حسب کلوین (k) می باشد. لازم به ذکر است که با رسم $\ln D_{eff}$ در برابر عکس دما، انرژی فعال سازی محاسبه گردید.

مورد نظر به مخزن گاز نیتروژن با سرعت های مختلف (۲) - ۰/۲ لیتر بر دقیقه) متصل گردید. دور همزن دستگاه ۱۶۰۰ دور بر دقیقه و مدت زمان انتخابی ۵ دقیقه در نظر گرفته شد. پس از تولید کف شیر موز و انتخاب نمونه بهینه براساس کمترین دانسیته و بیشترین پایداری، سینتیک خشک کردن این نمونه مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور از خشک کن هوای داغ (Memmert-آلمان) در دمای ۵۰، ۶۵ و ۸۰ درجه سانتی گراد استفاده شد و نمونه ها در فواصل زمانی ۵ دقیقه ای از خشک کن خارج گردیدند و توسط ترازوی دیجیتال (مدل AND-EK-3001 ساخت ژاپن) با دقت ۰/۰۱ توزین شدند. این فرآیند تا رسیدن نمونه ها به یک وزن ثابت ادامه یافت. همچنین باید گفت که ضخامت نمونه های قرار گرفته در خشک کن ۳ و ۵ میلی متر بود (۱۸). در این بخش ضریب نفوذ رطوبت و انرژی فعال سازی محاسبه گردید.

۲-۲- دانسیته کف

برای تعیین دانسیته کف، با استفاده از استوانه مدرج وزن ۵۰ میلی لیتر از نمونه کف در دمای محیط (۲۲-۲۵ درجه سانتی گراد) مطابق با روش کار و همکاران (۲۰۰۹) محاسبه گردید (۱۶). لازم به ذکر است جهت جلوگیری از تخریب ساختار کف و نیز ممانعت از ایجاد حفره هوا درون استوانه مدرج، انتقال کف به درون استوانه با دقت انجام شد. دانسیته کف شیر موز به صورت جرم واحد حجم با واحد gr/cm^3 بیان شد (۲۲).

$$\text{رابطه ۱} \quad \text{کف دانسیته} = \frac{\text{وزن کف (گرم)}}{\text{حجم کف (سانتیمتر مکعب)}}$$

۲-۳- پایداری کف

پایداری کف براساس میزان آب اندازی آن مطابق با روش نارندر و پال (۲۰۰۹) محاسبه گردید که ۵۰ گرم کف به درون قیف باختر با قطر ۸ میلی لیتر با صافی و مش ۴۰ میلی ریخته شد سپس قیف و محتویات آنرا به استوانه مدرج با حجم ۵۰ میلی لیتر انتقال می دهیم و مقدار مایع جدا شده از نمونه کف در اثر نیروی جاذبه در دمای محیط (۲۲-۲۵

۲-۶- تجزیه و تحلیل آماری

در بخش اول این پژوهش از روش سطح پاسخ به منظور ارزیابی میزان دانسیته و پایداری کف شیر موز استفاده شد. آزمایشات براساس طرح مرکب مرکزی محاسبه گردید. در این آزمایش سه کد (-۱، صفر و ۱) برای هر یک از متغیرها مشخص شد که به ترتیب سطح پایینی، متوسط و سطح بالایی بودند. متغیرهای غیر وابسته و سطوح کد و سطح غیر کد در جدول ۱ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که متغیرهای مستقل نسبت ثابت ۱ موز و متغیر شیر خشک (۳-۶) درصد وزنی/وزنی، صمغ گزانتان (۰/۲۵) - ۰/۱۵ درصد وزنی/وزنی) و سرعت گاز نیتروژن (۲ - ۰/۲ - لیتر بر دقیقه) بود. از سوی دیگر متغیرهای وابسته این

پژوهش در جدول (۲) نمایش داده شده است. به دلیل برخی از اشتباهات سیستماتیک و غیرقابل پیش‌بینی در مرکز پاسخ مشاهدات شش تکرار لحاظ گردید. همچنین در فرمول ذیل Y پاسخ تخمین زده شده دانسیته و پایداری، b_0, b_1, b_i ضرایب ثابت x_i, x_j بیان کننده متغیرهای مستقل کد گذاری شده، هستند. کیفیت و صحت مدل رگرسیونی و مناسب بودن برازش صورت گرفته بوسیله پارامترهایی نظیر آنالیز مدل، ضعف برازش و ضریب تعیین مشخص گردید (۱۸). سطوح پاسخ میانگین دیگر متغیرها بر حسب مدل سطح پاسخ ارزیابی شد و آنالیز واریانس (ANOVA) و مدل رگرسیون با نرم افزار design expert محاسبه گردید.

$$Y_k = \beta_{k0} + \sum_{i=1}^3 \beta_{ki} x_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{kii} x_i^2 + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \beta_{kij} x_i x_j + e_k \quad \text{رابطه ۶}$$

جدول ۱- کدهای پاسخ سطح و نسبت سطوح متغیرهای وابسته

متغیر های وابسته	کد		
X_1 : زانتان (گرم/گرم)	+۱	۰	-۱
X_2 : گاز نیتروژن (لیتر/دقیقه)	۰/۱۵	۰/۲	۰/۲۵
X_3 : موز/شیر (%)	۰/۲	۱/۱	۲
	%۳	۴/۱۵	%۶

جدول ۲- رویه سطح پاسخ برای متغیرهای مستقل برحجم آب اندازی و دانسیته مختلف کف شیرموز

ردیف	متغیر مستقل		متغیر وابسته		
	صمغ زانتان	گاز ورودی	درصد شیر به موز	حجم آب اندازی	دانسیته
۱	۰/۲۵	۲	۳	۰	۰/۴۵
۲	۰/۲۵	۰/۲	۳	۰	۰/۴۷
۳	۰/۲	۲	۴/۵	۲/۵	۰/۴۹
۴	۰/۱۵	۱/۱	۴/۵	۳	۰/۴۲
۵	۰/۲۵	۲	۶	۴/۵	۰/۴۵
۶	۰/۱۵	۲	۶	۶	۰/۳۹
۷	۰/۲	۱/۱	۴/۵	۲/۳	۰/۴۸
۸	۰/۲۵	۰/۲	۶	۳/۲	۰/۵۷
۹	۰/۲	۱/۱	۶	۴	۰/۴۵
۱۰	۰/۱۵	۲	۳	۳	۰/۴۸
۱۱	۰/۱۵	۰/۲	۳	۱	۰/۴۴
۱۲	۰/۲	۱/۱	۴/۵	۲/۳	۰/۴۹
۱۳	۰/۲	۱/۱	۴/۵	۲/۵	۰/۴۷
۱۴	۰/۲۵	۱/۱	۴/۵	۱/۵	۰/۴۸
۱۵	۰/۲	۰/۲	۴/۵	۱	۰/۴۹
۱۶	۰/۲	۱/۱	۳	۲	۰/۴۶
۱۷	۰/۲	۱/۱	۴/۵	۲/۵	۰/۴۶
۱۸	۰/۱۵	۰/۲	۶	۳/۳	۰/۳۹
۱۹	۰/۲	۱/۱	۴/۵	۲	۰/۴۵
۲۰	۰/۲	۱/۱	۴/۵	۲/۳	۰/۴۸

۱-۶-۳- بهینه یابی

به منظور دستیابی به سطح بهینه متغیرهای غیروابسته (سرعت گاز نیتروژن، میزان صمغ گزانتان و موز) از نرم افزار Design-Expert نسخه ۶/۰۲ استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی اثر متغیرهای مستقل بر دانسیته کف

به منظور بررسی روند تغییر متغیرهای پاسخ با متغیرهای مستقل و پیش بینی پاسخ دانسیته، مدل های مختلفی بر داده های حاصل از آزمون های طراحی شده، برازش گردید.

تجزیه آنالیز واریانس (جدول ۳) نشان داد که غلظت صمغ گزانتان و هوای ورودی به صورت خطی اثر معنی داری ($p < 0/05$) بر دانسیته کف داشتند. این در حالی بود که هرچند افزایش میزان موز سبب افزایش دانسیته گردید اما این افزایش معنی دار نبود. همچنین نتایج مدل چند جمله ای درجه دوم صمغ گزانتان، هوای ورودی و میزان موز بیانگر اثر معنی دار ($p < 0/05$) بود. همچنین با قرار دادن بهترین مدل، چند جمله ای درجه دوم در معرض الگوریتم حذف مدل تجربی نهایی در قالب فاکتورهای کد گذاری شده که

ترتیب به تولید کف پالپ میوه bael، میگو، قارچ و طالبی پرداختند، مشابهت داشت (۲۸، ۳، ۲ و ۲۴). از سوی دیگر براساس نتایج ارائه شده در شکل ۲ می‌توان گفت که افزایش میزان گاز ورودی تا سطح ۱/۱ لیتر بر دقیقه میزان دانسیته کاهش و پس از آن افزایش این پارامتر مشاهده گردید. به نظر می‌رسد در ابتدای فرآیند تولید کف با ورود میزان گاز به سیستم، به دام انداختن حباب‌های هوا در سطح بالایی اتفاق افتاد که به موجب آن دانسیته کاهش یافت. همچنین افزایش میزان دنا تورا سیون پروتئین‌ها و غیر طبیعی شدن آن‌ها با اثرگذاری بر کاهش کشش سطحی در کاهش میزان دانسیته مؤثر بود (۲۶). اما در سطوح بیش از ۱/۱ لیتر بر دقیقه با افزایش میزان گاز ورودی، گویچه‌های هوا در داخل مایع با یکدیگر ادغام شده و اندازه حباب‌ها افزایش یافت که این امر به نوبه خود افزایش دانسیته را به دنبال داشت. در ارتباط با افزایش درصد موز نسبت به شیر دانسیته کف تا حدودی افزایش یافت هر چند این افزایش معنی‌دار بود. به احتمال زیاد علت این امر کاهش رقت کف شیر موز و افزایش ویسکوزیته فاز پیوسته ناشی از افزایش غلظت مواد جامد و ممانعت از ورود هوا به درون سیستم طی فرایند هم زدن می‌باشد (۳، ۴ و ۱۷).

اثر معنی‌داری روی دانسیته کف داشتند، معادله زیر ارائه گردید.

$$Fd = 0.47 + 0.28 X_1 - 0.12 X_2 - 0.18 X_1^2 + 0.22 X_2^2 - 0.18 X_3^2 - 0.2 X_1 X_2 + 0.28 X_1 X_3 - 0.2 X_2 X_3$$

در این رابطه X_1 مقدار غلظت صمغ (درصد)، X_2 میزان هوای ورودی (لیتر بر دقیقه) و X_3 میزان موز (درصد) بود. با توجه به مدل ارائه گردیده، افزایش میزان غلظت صمغ سبب افزایش دانسیته شد. همچنین میزان هوای ورودی در یک ضریب منفی افزایش دانسیته را نشان داد. لازم به ذکر است که دانسیته کف شیر موز بین ۰/۳۹ و ۰/۵۷ لیتر بر دقیقه بود. از سوی دیگر تغییرات میزان دانسیته تحت تأثیر میزان گاز ورودی، غلظت صمغ گزانتان و میزان موز به صورت سه بعدی در شکل ۱ و ۲ آورده شده است. همانطور شکل ۱ نشان می‌دهد با افزایش سطح صمغ گزانتان، دانسیته کف افزایش یافت. علت این امر را چنین می‌توان توجیه نمود که صمغ از طریق افزایش ویسکوزیته، از ورود هوا به داخل مایع ممانعت نمود و حداکثر هوای محبوس شده در کف را کاهش داد. از این رو افزایش دانسیته مشاهده گردید (۱۶). نتایج پیش رو با نتایج بگ و همکاران (۲۰۱۱)، عزیزپور و همکاران (۲۰۱۳)، پاسبان (۱۳۹۲) و صلاحی (۱۳۹۳) که به

جدول ۳- آنالیز و واریانس مدل چند جمله‌ای بر پاسخ دانسیته و پایداری

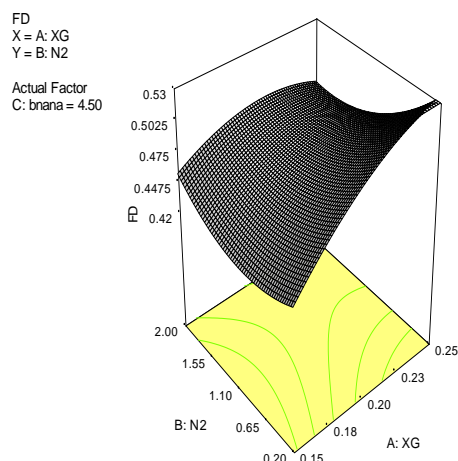
منابع	دانشیته کف	حجم اب اندازی	درجه آزادی	p	میانگین مربعات
	P				میانگین مربعات
A(غلظت صمغ)	<0/001		9	<0/001	5/04
B(میزان گاز ورودی)	0/396		1	<0/001	5/62
C(نسبت شیر به موز)	not significant		1	<0/001	22/50
A ²	0/295		1	not significant	0/002
B ²	0/0358		1	0/241	0/61
C ²	0/0843		1	0/014	1/66
AB	0/0008		1	0/022	1/45
AC	0/001<		1	0/016	0/72
BC	0/0041		1	0/376	0/50
جمع			10		0/87
عدم برازش	0/6757		5	0/071	0/7
خطا			5		0/17
جمع کل			19		28/69

حذف مدل تجربی نهایی در قالب فاکتورهای کد گذاری شده که اثر معنی داری روی دانسیته کف داشتند، معادله زیر ارائه گردید.

$$DV = 8/86 - 26/17X_1 - 3/17X_2 - 3/17X_3 - 0/538X_1^2 + 0/34X_2^2 - 9/4X_1X_2 + 0/4X_1X_3 + 0/18X_2X_3$$

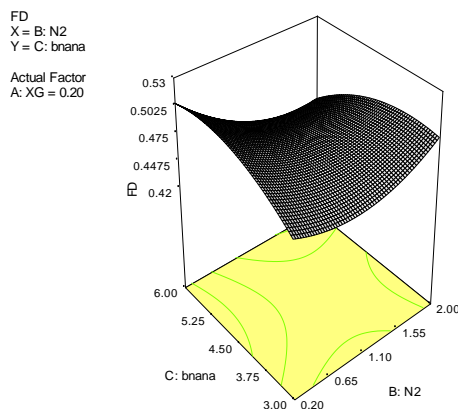
در این رابطه X_1 مقدار غلظت صمغ (درصد)، X_2 میزان هوای ورودی (لیتر بر دقیقه) و X_3 میزان موز (درصد) بود. با توجه به مدل ارائه گردیده افزایش صمغ گزانتان در یک ضریب منفی سبب کاهش آب اندازی (افزایش پایداری) شد. این در حالی بود که میزان هوای ورودی و سطح مصرفی موز با ضریب مثبت سبب افزایش آب اندازی (کاهش پایداری) گردید. از سوی دیگر تغییرات میزان پایداری تحت تأثیر میزان گاز ورودی، غلظت صمغ گزانتان و میزان موز به صورت سه بعدی در شکل ۳ و ۴ آورده شده است. همانطور شکل ۳ نشان می دهد صمغ گزانتان نقش اساسی و مهم در پایداری کف داشت. به طوری که افزایش میزان آن می تواند با افزایش ویسکوزیته فاز پیوسته سبب افزایش مقاومت دیواره حباب های هوا گردد و از فروپاشی آن ها ممانعت نماید (۲۵). از سوی دیگر عطاردی (۱۳۹۱) و صلاحی (۱۳۹۴) در مطالعه خود به ترتیب در زمینه تولید کف ریز جلبک اسپرو لینا و طالبی بیان نمودند که افزایش ویسکوزیته فاز مایع سبب ایجاد یک ساختار شبکه ای در فاز پیوسته شده که به موجب آن دیواره فصل مشترک حباب ها از شکسته شدن حفظ می گردد و از این طریق شرایط بهبود پایداری کف مهیا می گردد (۲۴ و ۳). در ارتباط با میزان گاز ورودی باید گفت که در ابتدای فرآیند تولید کف شیر موز به دلیل دنا توراسیون بیشتر پروتئین های شیر و افزایش گروه های آبدوست در سطح، میزان پایداری افزایش یافت. اما در انتهای این فرآیند نتیجه ای عکس یعنی کاهش پایداری و به عبارتی افزایش آب اندازی مشاهده گردید. علت این امر را می توان به فروپاشی حباب های گازی نسبت داد. همچنین شکل ۴ بیانگر آن است که افزایش سطح مصرفی موز، مقدار مایع جدا شده کاهش (آب اندازی کاهش) و پایداری کف شیر موز افزایش یافت. فالاده و همکاران (۲۰۰۳) در مطالعه خود به نتایج مشابهی دست

DESIGN-EXPERT Plot



شکل ۱- اثر متقابل زانتان و نیتروژن بر دانسیته کف

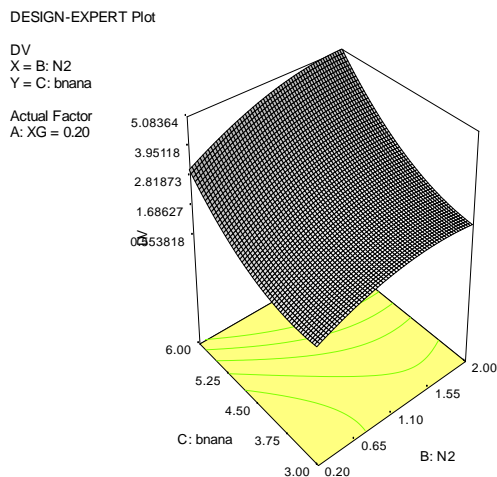
DESIGN-EXPERT Plot



شکل ۲- اثر متقابل موز و نیتروژن بر دانسیته کف

۲-۳- بررسی اثر متغیرهای مستقل بر پایداری کف

تجزیه آنالیز واریانس (جدول ۳) به وضوح بیانگر آن بود که غلظت صمغ، سرعت گاز ورودی و میزان سطح مصرفی شیر بر میزان پایداری کف اثر معنی داری ($p < 0/01$) داشت. همچنین اثر درجه دوم غلظت صمغ گزانتان اثری غیرمعنی دار از خود نشان داد. در حالیکه سرعت گاز ورودی و میزان موز مصرفی به ترتیب دارای اثر معنی دار در سطح ($p < 0/01$) و ($p < 0/05$) بودند. لازم به ذکر است که عبارت حجم زهکشی در ارتباط با پایداری کف است. بدین معنی که هرچه حجم زهکشی یا همان آب اندازی کمتر باشد، کف از پایداری بیشتری برخوردارست. با قرار دادن مدل چند جمله ای درجه دوم در معرض الگوریتم

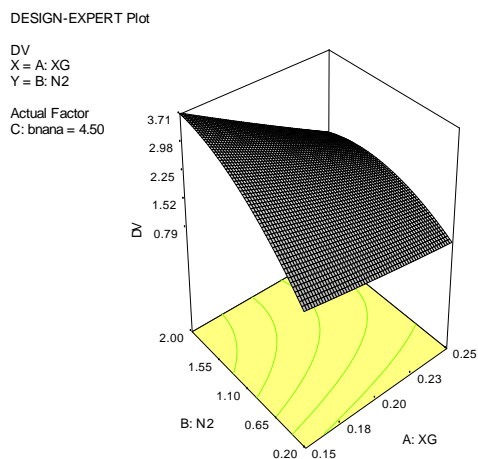


شکل ۴- اثر متقابل موز و نیتروژن بر پایداری کف

۳-۳- بهینه‌یابی

در این بخش (جدول ۴) هدف از بهینه‌یابی بهبود خصوصیات فیزیکوشیمیایی کف شیر موز بود. تنظیمات انجام شده جهت بهینه‌یابی، شامل متغیرهای فرآیند (سرعت گاز نیتروژن ورودی برحسب لیتر بر دقیقه) در محدوده آزمایش و متغیرهای فرمولاسیون (غلظت صمغ گزانتان و موز برحسب درصد) در محدوده فرآیند بود. همچنین خصوصیات تولید کف براساس کمینه دانسیته و بیشینه پایداری تنظیم گردید. نتایج این بخش به وضوح نشان داد زمانی که میزان صمغ گزانتان ۰/۲۲ درصد، سرعت هوای ورودی ۰/۲ لیتر بر دقیقه و میزان موز ۳ درصد بود، کمترین میزان دانسیته و بیشترین میزان پایداری کف شیر موز حاصل گردید. از این رو نمونه مذکور به عنوان نمونه بهینه جهت بررسی سینتیک انتقال جرم در طی خشک کردن با هوای داغ انتخاب گردید.

یافتند و بیان نمودند که افزایش مواد جامد در سوسپانسیون از طریق افزایش ویسکوزیته بر بهبود پایداری کف نقش داشت (۱۹). علاوه بر این براساس نتایج بدست آمده (شکل ۴) مشخص گردید که بیشترین میزان آب اندازی یا کمترین پایداری کف در بالاترین سرعت هوای ورودی بود. در این زمینه جرمیک و همکاران (۱۹۹۴) بیان نمودند اگر سائز حباب‌های هوا در سوسپانسیون کوچکتر از حد معمول گردد، پایداری کف نسبت به زمانی که حباب‌های بزرگتر در نمونه موجود است به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد (۱۲). این امر به دلیل گرادیان بردار پلانتر (برخلاف جاذبه زمین) است که در حباب‌های بزرگتر، کمتر می‌باشد. به عبارت دیگر، میزان بالایی از آب در داخل کف همگن سبب کاهش پلانتر و افزایش آب اندازی می‌گردد (۶).



شکل ۳- اثر متقابل صمغ زانتان و نیتروژن بر پایداری کف

جدول ۴- ضریب نفوذ و انرژی فعالسازی کف شیر موز در دماهای مختلف خشک کردن

ضخامت (میلی متر)	دما (سانتی گراد)	مرحله	R ²	انرژی فعالسازی (مترمربع/ثانیه)	ضریب نفوذ (مترمربع/ثانیه)	Ea (کیلوژول/ولت)
۳	۵۵	۱	۰/۹۴	$9/3 \times 10^{-8}$	$5/02 \times 10^{-7}$	۱۹/۲۳
		۲	۰/۹۳	$5/1 \times 10^{-7}$		
	۶۵	۱	۰/۹۵	$1/18 \times 10^{-8}$	$6/6 \times 10^{-7}$	
		۲	۰/۹۹	$7/6 \times 10^{-7}$		
	۸۰	۱	۰/۹۷	$2/5 \times 10^{-7}$	$1/3 \times 10^{-6}$	
		۲	۰/۹۷	$7/7 \times 10^{-7}$		
۵	۵۵	۱	۰/۹۸	$1/54 \times 10^{-7}$	$8/67 \times 10^{-7}$	۲۲/۱۳
		۲	۰/۹۳	$1/37 \times 10^{-6}$		
	۶۵	۱	۰/۹۸	$1/91 \times 10^{-7}$	$8/17 \times 10^{-7}$	
		۲	۰/۹۴	$1/5 \times 10^{-6}$		
	۸۰	۱	۰/۹۸	$3/15 \times 10^{-7}$	$1/274 \times 10^{-6}$	
		۲	۰/۹۱	$2/23 \times 10^{-5}$		

خشک کردن کف شیر موز در دو مرحله B (دوم) و C (سوم) نزولی بود. به نظر می‌رسد علت بالا بودن سرعت خشک شدن در مرحله اول به دلیل بیشتر بودن محتوای رطوبت در سطح کف باشد. همچنین پایین بودن نرخ خشک شدن در مرحله دوم و سوم تحت تأثیر مقاومت در برابر انتقال جرم درونی و عدم حذف رطوبت است که نفوذ رطوبت در این حالت تا حدود زیادی به میزان خلل و فرج و واکنش بین آب و ساختار کف بستگی دارد (۲۳). تغییرات ضریب نفوذ مؤثر و انرژی فعالسازی در جدول ۵ آمده است. نتایج نشان داد با افزایش دما میزان این پارامتر افزایش یافت که دلیل این امر اثر دما در افزایش شدت فعل و انفعالات و جنبش مولکولی است. در این راستا راج کاپور و همکاران (۲۰۰۷) و صلاحی (۱۳۹۴) به ترتیب نتایج مشابهی را با خشک نمودن کف پالپ انبه و طالبی گزارش نمودند (۲۷ و ۲۸). همچنین میانگین ضریب نفوذ کف شیر موز با ضخامت ۳ و ۵ میلی‌متر (در دمای ۵۵ تا ۸۰ درجه

۴-۳- بررسی سینتیک انتقال جرم نمونه بهینه در طی

خشک کردن با هوای داغ

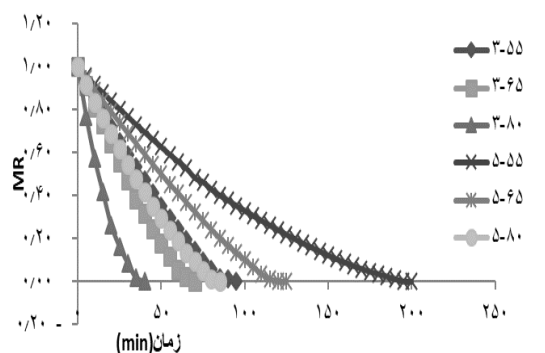
زمان خشک شدن نمونه بهینه تحت تأثیر دمای خشک کن هوای داغ (۵۰، ۶۵ و ۸۰ درجه سانتی گراد) و ضخامت کف شیر موز (۳ و ۵ میلی‌متر) در شکل ۵ ارائه گردیده است. همانطور که نتایج نشان می‌دهد با افزایش دمای خشک کن و کاهش ضخامت کف، زمان خشک کردن کاهش یافت. همچنین براساس نتایج مشخص گردید زمان خشک شدن نمونه با ضخامت ۳ میلی‌متر کف شیر موز در دمای ۵۰، ۶۵ و ۸۰ درجه سانتی گراد به ترتیب ۴۵، ۴۰ و دقیقه بود. علاوه بر این نتایج بدست آمده در ضخامت ۵ میلی‌متر کف شیر موز و دمای ۵۰، ۶۵ و ۸۰ درجه سانتی گراد بیانگر مدت زمان ۸۰، ۷۵ و ۶۵ دقیقه بود. از سوی دیگر نتایج بدست آمده از سرعت خشک کردن نمونه بهینه در شکل ۶ ارائه گردیده است. نتایج به وضوح نشان می‌دهد، در مرحله A (اول) بالاترین نرخ گرمایی وجود داشت. در حالیکه سرعت

بهینه انتخاب گردید. در فاز دوم به مطالعه سینتیک انتقال جرم این نمونه در طی خشک کردن با هوای داغ پرداخته شد. نتایج به وضوح نشان داد میانگین ضریب نفوذ کف شیر موز با ضخامت ۳ و ۵ میلی‌متر (در دمای ۵۰ تا ۸۰ درجه سلیسیوس) به ترتیب در محدوده $5/02 \times 10^{-7}$ - 10×10^{-6} و $1/3$ و $6/7 \times 10^{-7}$ - $1/6 \times 10^{-6}$ بود. از سوی دیگر با بررسی انرژی فعال‌سازی، میزان انرژی ۱۹/۲۳ و ۲۲/۱۳ کیلو ژول بر مول به ترتیب برای نمونه با ضخامت ۳ و ۵ میلی‌متر کف شیر موز در دمای ۵۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد گزارش گردید.

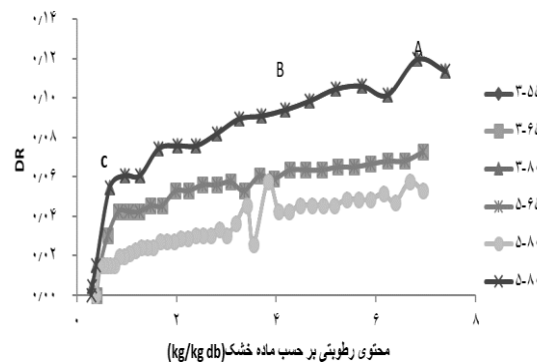
۵-منابع

1. Akpınar, E., Midilli, A. and Bicer, Y. 2003. Single layer drying behavior of potato slices in a convective cyclone and mathematical modeling. *Energy Convers. Manage*, 44: 1689–1705.
2. Azizpour, M., Mohebbi, M., KHodaparast, M.H.H. and Varidi, M. 2013. Foam-mat drying of shrimp: Characterization and drying kinetics of foam. *CIGR Journal*, 15: 159–165.
3. Bag, S.K., Srivastav, P.P. and Mishra, H.N. 2011. Optimization of process parameters for foaming of bael (*Aegle marmelos* L.) fruit pulp. *Food Bioprocess Technology*, 4: 1450–1458.
4. Butz, P. and Tauscher, B. 2002. Emerging technologies: Chemical aspects. *Food Research. International*, 35: 279–284.
5. Carlos Jimenez-Junca, Alexander Sher, Jean-Claude Gumyc, K. Niranjana. 2015. Production of milk foams by steam injection: The effects of steam pressure and nozzle design. *Journal of Food Engineering*, 166: 244-247.
6. Carlos Jimenez-Junca, Alexander Sher, Jean-Claude Gumyc, K. Niranjana. 2015. Production of milk foams by steam injection: The effects of steam pressure and nozzle design. *Journal of Food Engineering*, 166: 244-247.

سانتی‌گراد) به ترتیب در محدوده $5/02 \times 10^{-7}$ - 10×10^{-6} و $1/3$ و $6/7 \times 10^{-7}$ - $1/6 \times 10^{-6}$ بود. از سوی دیگر انرژی فعال‌سازی (EA) که از تغییرات $\ln Deff$ در برابر عکس دما بدست می‌آید، بیانگر میزان ۱۹/۲۳ و ۲۲/۱۳ کیلو ژول بر مول به ترتیب در ضخامت ۳ و ۵ میلی‌متر کف شیر موز در دمای ۵۵ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد بود. در این زمینه عزیزپور و همکاران (۲۰۱۳) و صلاحی (۱۳۹۴) به ترتیب انرژی فعال‌سازی در طی خشک کردن کف میگو و طالبی را ۳۲/۱۶ و ۳۳/۷۴ کیلو ژول بر مول گزارش نمودند (۲۸) و (۲).



شکل ۵-منحنی خشک کردن کف شیر موز در دماهای مختلف خشک کردن در ضخامت ۳ و ۵ میلی‌متر نمونه



شکل ۶-سرعت خشک کردن شیر موز در شرایط مختلف در دماهای مختلف خشک کردن در ضخامت ۳ و ۵ میلی‌متر نمونه

۴-نتیجه‌گیری

این پژوهش در دو فاز انجام گردید. فاز اول با هدف بهینه‌یابی تولید کف شیر موز با کمترین میزان دانسیته و آب‌اندازی (بیشترین پایداری) انجام شد که در نهایت نمونه تولیدی با سرعت ۰/۲ لیتر بر دقیقه گاز نیتروژن، ۰/۲۲ درصد صمغ گزانتان و نسبت ۳ به ۱ شیربه موز به عنوان نمونه

- juice recovery from guava fruit using response surface methodology. *Food Bioprocess Technology*, 2: 96–100.
19. Marquez, C. A. & DeMichelis, S. A. G. (2006). Drying kinetics of rose hip fruits (*Rosa eglanteria* L.), *Journal of Food Engineering*, 77, 566:575.
 20. Masters, K. 1985. *Spray drying handbook*. New York, John Wiley and Sons.
 21. Mate, J.I., Zwietering, M. and van't Riet, K. 1999. The effect of blanching on the mechanical and rehydration properties of dried potato slice., *European Food Research and Technology*, 209, 5, 343–34.
 22. NARENDER, R.P. and PAL, D. 2009. The physico-chemical, sensory, and textural properties of misti dahi prepared from reduced fat Buffalo milk. *Food Bioprocess Technology*, 2: 101–108.
 23. Okos, M.R., Narsimhan, G., Singh, R.K. and Weitnauer, A.C. 1992. Food dehydration. In *Food Dehydration* (D.R. Heldmann and D.B. Lund, eds.) pp. 437–562, Marcel Dekker, New York.
 24. Paseban, A., Mohebbi, M., Pourazarang, H., Varidi, M., Abbasi, A., 2014. Optimization of foaming condition and drying behavior of white button mushroom., *Journal of Food Processing and Preservation*, 39.6., 737–744.
 25. Prins, A. 1988. Principles of foam stability. In *Advances in Food Emulsions and Foams* (E. Dickinson and G. Stainsby, eds.) pp. 91–122, Elsevier Applied Science, New York, NY.
 26. Rahatitsif, N., Genovese, D.B. and Ratti, C. 2006. Characterization of apple juice foams for foam-mat drying prepared with egg white protein and methylcellulose. *International Journal of Food Science*, 71: 142–151.
 27. Rajkumar, P., Kailappan, R., Viswanathan, R., Raghavan, G.S.V. and Ratti, C. 2007. Foam mat drying of alphonso mango pulp. *Dry. Technol*, 25: 357–365.
 28. Salahi, M. Mohebbi, M., Taghizadeh, M., 2015. foam mat drying cantaloupe (*Cucumis*
 7. Crank, J. 1975. *The Mathematics of Diffusion*, 2nd Ed., Oxford University Press, London.
 8. Damodaran, s. 1996. *Amino acids, Peptides and Protein in Food Chemistry*, 3, ed. Fennema, O.R. New York, 157–233.
 9. Falade, K.O., Adeyanju, K.I. and Uzo-Peters, P.I. 2003. Foam-mat drying of cowpea (*Vigna unguiculata*) using glycerylmonostearate and egg albumin as foaming agents. *Journal of European Food Research Technology*, 217(6): 486–491.
 10. Fernandes, F.A.N., Gallo, M.I. and Rodrigues, S. 2008. Effect of osmotic dehydration and ultrasound pretreatment on cell structure: Melon dehydration. *LWT—Food Science and Technology*, 41: 604–610.
 11. Frison, E.A. and Sharrock, S.L. 1999. Introduction: the economic, social and nutritional importance of banana in the world. In *Bananas and Food Security*. International Symposium, Douala, Cameroon, 21–35.
 12. Germick, R.J., Rehill, A.S., Narsimhan, G., 1994. Experimental investigation of static drainage of protein stabilized foams – comparison with model. *Journal of Food Engineering*, 23: 3285–578.
 13. Haard, N.F. 1984. Postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables. *Journal of Chemical Education*, 61: 277–283.
 14. <http://www.fao.org>.
 15. Kadam, D.M. and Balasubramanian, S. 2010. Foam mat drying of tomato juice. *Journal of Food Processing and Preservation*, 1745–4549.
 16. KARIM, A.A. and WAI, C.C. 1999. Characteristics of foam prepared from starfruit (*Averrhoa carambola* L.) puree by using methyl cellulose. *Food Hydrocolloids*, 13: 203–210.
 17. Karim, A.A. and Wai, C.C. 1999. Characteristics of foam prepared from starfruit (*Averrhoa carambola* L.) puree by using methyl cellulose. *Food Hydrocolloids*, 13: 203–210.
 18. KAUR, S., SARKAR, B.C., SHARMA, H.K. and Singh, C. 2009. Optimization of enzymatic hydrolysis pretreatment conditions for enhanced

- suspending and gelling agent. Food Chemistry, 6: 63–76.
31. Zomorodian, A. & Moradi, M. (2010). Mathematical Modeling of Forced Convection Thin Layer Solar Drying for Cuminumcyminum. J. Agriculture Science Technology . Vol. 12: 401-408.
29. melo) pulp: optimization of foaming conditions and investigation of powder properties. Journal of Food Processing and Preservation, 6,39, 1798–1808.
30. Symers, K.C. 1980. The relationship between the covalent structure of the xanthomonas polysaccharide (xanthan) and its function as a thickening,