نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد 14، شماره 5، آذر- دی 1397، ص.876- 865

Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 14, No. 5, Dec- Jan 2019, p. 865-876

اثر ترکیب خوراک و متغیرهای فرایند بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی کف‌های جامد تشکیل شده از نشاسته ذرت و دانه کنجد به روش اکستروژن

شهرام بیرقی طوسی[1]- محبت محبی[2*]- مهدی وریدی[3]

تاریخ دریافت: 1395/12/17
تاریخ پذیرش: 1396/07/22

چکیده

در این پژوهش اثر متغیرهای ترکیب خوراک، دمای فرایند، سرعت چرخش ماردون و قطر منفذ قالب در فرایند اکستروژن بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی کف‌های تولید شده بر پایه نشاسته ذرت حاوی دانه کنجد مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور دانه کنجد با نسبتهای صفر، 10، 20 و 30 درصد با نشاسته ذرت در رطوبت نهایی 15 درصد مخلوط گردید. برای تولید کف‌ها، مخلوطهای تهیه شده با مقدار 40 کیلوگرم بر ساعت وارد اکسترودر دو ماردون با چرخش هم جهت شد. متغیرهای دما در سه سطح 120، 145 و 170 درجه سانتی‌گراد، سرعت چرخش ماردون در سطوح 120، 150 و 180 دور بر دقیقه و قطر منفذ قالب در دو سطح 2/5 و 4 میلی‌متر روی آنها اعمال شد. با بررسی نتایج آزمون‌ها مشخص گردید افزودن 10 درصد دانه کنجد باعث بیشینه انبساط و تخلخل و کمینه چگالی ذره‌ای نمونه‌ها شد در حالی که افزودن 30 درصد دانه کنجد به دلیل افزایش میزان چربی و کاهش فشار فرایند دقیقا نتایج مخالف نشان داد. افزایش دمای فرایند و سرعت چرخش ماردون و کاهش قطر منفذ قالب که باعث افزایش انرژی اعمال شده بر مواد درون اکسترودر می‌شوند شاخص انحلال در آب و انبساط کف‌ها را افزایش و میزان رطوبت باقی‌مانده، شاخص جذب آب و چگالی آنها را کاهش دادند.

واژه‌های کلیدی: اکسترودر، دمای فرایند، سرعت چرخش ماردون، قالب، رطوبت باقی‌مانده، چگالی، انبساط

مقدمه

یکی از مهمترین ویژگی‌های فرایند اکستروژن در صنعت غذا ایجاد فراورده‌ای با بافت یکنواخت و شکل خاص می‌باشد. در این فرایند مواد بیوپلیمری نظیر نشاسته با رطوبت پایین پس از اعمال دما و فشار تبدیل به بیوپلیمر مذاب شده که هنگام خروج از منفذ قالب، آب فوق داغ بیوپلیمر مذاب به بخار تبدیل و در فاز پیوسته پراکنده می‌شود. با خروج بخار و سرد شدن سریع فراورده، ساختار سلول‌ها شکل می‌گیرد و کف جامد با شکل قالب تولید می‌شود (Kalin, 1979; Nam, 2002).

ترکیب مواد اولیه از مهمترین عوامل موثر بر ویژگی‌های کف جامد غذایی تهیه شده به روش اکستروژن می‌باشد. از اجزای اصلی تشکیل‌دهنده خوراک در فرایند اکستروژن مواد غذایی علاوه بر نشاسته و رطوبت می‌توان به چربی، پروتئین و فیبر اشاره کرد. اگرچه روغن‌ها و چربی‌ها در غلظت‌های پایین تاثیرات قابل توجهی بر فرایند تخریب نشاسته ندارند و حتی با ایجاد پیوند با آن می‌توانند باعث افزایش حجم فراورده اکسترود شده شوند اما در غلظت‌های بالا می‌توانند تجزیه و شکسته شدن بیوپلیمرهای نشاسته را به اندازه‌ای کاهش دهند که افزایش حجمی در ماده اکسترود شده دیده نشود. از سوی دیگر پروتئین‌ها طی فرآیند پخت اکستروژن دناتوره می‌شوند که این امر منجر به از دست رفتن ظرفیت جذب آب آنها می‌شود و شرایط مناسبی برای تشکیل پیوندهای درون و بین مولکولی پروتئین با آمیلوز و آمیلوپکتین به وجود می‌آورد. بنابراین افزودن پروتئین نیز می‌تواند تخریب مولکولی نشاسته را کاهش دهد. همچنین مشخص شده است موادی نظیر فیبرها که در شرایط اکسترودر به حالت غیرمحلول باقی می‌مانند باعث کاهش میزان انبساط نمونه شده، میزان چگالی آن را افزایش می‌دهند (Lue *et al*., 1991; Moraru *et al*., 2003; Lazou *et al*., 2010; Yadav *et al*., 2013).

از دیگر عوامل موثر بر ویژگی‌های کف جامد غذایی تهیه شده به روش اکستروژن، شرایط فرایند می‌باشد. پژوهشگران مختلف با توجه به شرایط مورد بررسی خود تاثیر هر یک از متغیرهای فرایند را بر ویژگی‌های فراورده اکسترود شده متفاوت گزارش کرده‌اند. فشار از

1- دانشجوی دکتری، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد و استادیار، گروه پژوهشی فرآوری مواد غذایی، پژوهشکده علوم و فناوری مواد غذایی جهاد دانشگاهی، خراسان رضوی.
2 و 3- به‌ترتیب استاد و دانشیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
(*- نویسنده مسئول: Email: m-mohebbi@um.ac.ir)
DOI: 10.22067/ifstrj.v1396i0.63179

اصلی‌ترین متغیرهای فرایند اکستروژن مواد غذایی است که به‌طور مستقیم و غیرمستقیم تحت تاثیر نوع و میزان خوراک، سرعت چرخش ماردون، دمای فرایند و قطر منفذ قالب می‌باشد و باعث بروز یا تغییر در شدت واکنش‌های درون و برون مولکولی و ویژگی‌های ترکیبات خوراک می‌شود. کاهش قطر منفذ قالب یا مقدار مواد روان کننده نظیر آب و چربی در ترکیب خوراک و یا افزایش دمای فرایند یا سرعت چرخش ماردون باعث افزایش فشار فرایند می‌شود. همچنین افزایش دما علاوه بر تشدید تغییرات فرایندی پخت باعث افزایش اختلاف دما بین مواد درون اکسترودر و محیط بیرون شده و میزان و سرعت خروج بخار آب را از فراورده پس از خروج از منفذ قالب افزایش می‌دهد و بر ساختار و ویژگی‌های کف جامد غذایی تاثیر می‌گذارد (Moraru *et al*., 2003; Plews *et al*., 2009; O'Shea *et al*., 2014).

کنجد یکی از قدیمی‌ترین دانه‌های خوراکی شناخته شده توسط بشر است که در فراورده‌های غذایی مصرف بالایی دارد. این دانه علاوه بر کربوهیدرات حاوی مقادیر زیادی چربی، پروتئین و فیبر می‌باشد. (Namiki *et al*., 2001).

این پژوهش با هدف بررسی تاثیر جایگزینی درصدی از نشاسته ذرت با دانه‌ای خوراکی که حاوی مخلوطی از ترکیبات متنوع می‌باشد و تاثیر شرایط فرایند اکستروژن بر چگونگی تغییرات در ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی کف جامد تولیدی نسبت به کف تولید شده با نشاسته ذرت انجام شد به این منظور با افزودن نسبت‌های مختلف دانه کنجد به نشاسته ذرت با رطوبت مشخص و سپس اعمال فرایند اکستروژن، تاثیر ترکیب خوراک، دمای فرایند، سرعت چرخش ماردون و قطر منفذ قالب در فرایند اکستروژن، بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی کف‌های جامد تولیدی مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

نشاسته طبیعی ذرت تولیدی (Cargill، برزیل) متشکل از 25 درصد آمیلوز و 75 درصد آمیلوپکتین و دانه کنجد پوست‌گیری شده از عمده فروشی لوازم قنادی مشهد خریداری شد. به‌منظور آماده‌سازی نمونه‌ها برای عملیات اکستروژن، دانه کنجد به نسبت‌های مشخص (صفر، ده، بیست و سی درصد) با نشاسته ذرت مخلوط گردید و برای رسیدن رطوبت به 15 درصد به آن آب مقطر افزوده و در کیسه‌های پلی‌اتیلنی بسته‌بندی شد. برای به تعادل رسیدن رطوبت، نمونه‌ها به مدت یک شب در دمای محیط نگهداری شدند. مخلوط پایه آماده شده، توسط اکسترودر دوماردون با چرخش هم‌جهت از (Jinan Saixin (DS56-III، چین) و نسبت طول به قطر 15 با شرایط میزان خوراک 40 کیلوگرم در ساعت، سرعت چرخش ماردون 120، 150 و 180 دور بر دقیقه، دمای اکستروژن 120، 145 و 170 درجه سانتی‌گراد و قطر منفذ قالب 2/5 و 4 میلی‌متر اکسترود گردید. پس از سرد شدن فراورده‌های اکسترود شده روی نوارنقاله، نمونه‌برداری انجام شد و نمونه‌ها درون کیسه‌های پلی‌اتیلنی ضخیم زیپ‌دار کدگذاری شده قرار گرفته، درب‌بندی انجام شد. نمونه‌ها تا انجام آزمایش‌ها دور از نور و در دمای اتاق نگهداری شد.

رطوبت باقی‌مانده

رطوبت باقی‌مانده در نمونه‌ها که نشان‌دهنده میزان اختلاف دمای مواد درون اکسترودر و محیط بیرون در نمونه‌های با ترکیب خوراک یکسان است به روش آون‌گذاری در دمای 105 درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد (AOAC, 1990).

شاخص جذب آب[1] و شاخص انحلال در آب[2]

برای اندازه‌گیری شاخص جذب آب و شاخص انحلال در آب از روش Huang و همکاران (2014) با برخی تغییرات استفاده شد به این صورت که 5 میلی‌لیتر آب مقطر به 0/5 گرم نمونه‌ی آسیاب و الک شده با مش 30 درون لوله‌های سانتریفوژ افزوده شد و به مدت 30 ثانیه با شیکر لوله و در ادامه 30 دقیقه در شیکر با سرعت 100 دور بر دقیقه هم‌زدن انجام شد. سپس 15 دقیقه در سانتریفیوژ با دور g 3000 قرار گرفت. ماده خشک مایع رویی حاصل از سانتریفوژ، به روش آون‌گذاری در 105 درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد و از نسبت آن به وزن نمونه، شاخص انحلال در آب محاسبه شد. ژل باقی‌مانده در مرحله سانتریفوژ نیز وزن شد و از نسبت آن به وزن نمونه، شاخص جذب آب به‌دست آمد (Singh *et al*., 2015; Huang *et al*., 2014).

چگالی ذره‌ای

برای اندازه‌گیری چگالی ذره‌ای از روش جابجایی ارزن با اصلاحاتی مشابه روش Singh و همکاران (2015) استفاده شد. ابتدا وزن آب مقطر پر شده در داخل ظرف دارای حجم مشخص اندازه‌گیری شد. بار دیگر وزن دانه ارزن پر شده در ظرف اندازه‌گیری و چگالی ارزن با در نظر گرفتن چگالی آب مقطر برابر با یک محاسبه شد. سپس چند عدد از نمونه‌های تولیدی توزین شده، داخل ظرف قرار داده شد و بقیه فضای خالی ظرف توسط دانه‌های ارزن پر شد. از رابطه زیر برای به‌دست آوردن چگالی ذره‌ای نمونه‌های کف استفاده شد (Singh *et al*., 2015).

(1) چگالی ذره‌ای نمونه=(وزن نمونه × چگالی ارزن) / (وزن نمونه+(وزن ظرف حاوی ارزن- وزن ظرف حاوی نمونه و ارزن)

[1] Water Absorption Index (WAI)
[2] Water Solubility Index (WSI)

چگالی جامد

برای اندازه‌گیری چگالی جامد، وزن مشخصی از نمونه آسیاب و الک شده با مش 30 درون استوانه مدرج ریخته شد و به آرامی روی میز زده شد تا زمانی که کاهش حجمی مشاهده نشود سپس حجم آن تعیین شد. از نسبت وزن به حجم تعیین شده برای به‌دست آوردن چگالی جامد نمونه‌های کف استفاده شد (Ushakumari *et al.*, 2004; Yagci *et al.*, 2008).

تخلخل

تخلخل نمونه‌های کف با استفاده از چگالی‌های به‌دست آمده و طبق رابطه زیر محاسبه گردید (Plews *et al.*, 2009; O'Shea *et al.*, 2014).

$$\text{تخلخل} = \frac{\text{چگالی جامد} - \text{چگالی ظاهری}}{\text{چگالی جامد}} \quad (2)$$

نسبت انبساط شعاعی

برای محاسبه نسبت انبساط شعاعی، از هر تیمار ده نمونه به‌طور تصادفی انتخاب شد و قطر آن‌ها با استفاده از کولیس دیجیتال اندازه‌گیری شد. میانگین اندازه‌های گرفته شده به‌عنوان قطر نمونه تعیین شد. نسبت انبساط شعاعی از تقسیم قطر نمونه بر قطر منفذ قالب اکسترودر به‌دست آمد (Chanlat *et al.*, 2011; Huang *et al.*, 2014).

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

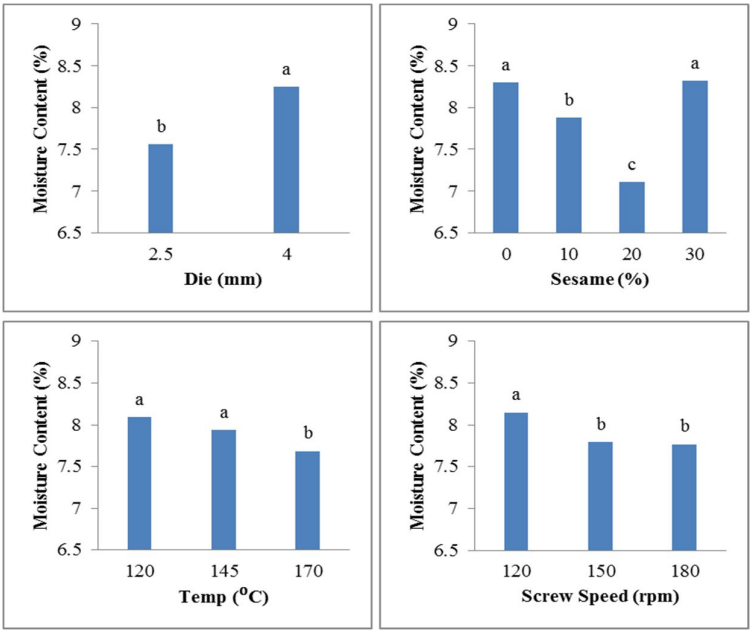
این تحقیق در قالب آزمایش فاکتوریل به‌صورت طرح کاملا تصادفی با چهار فاکتور نسبت دانه کنجد (چهار سطح)، سرعت چرخش ماردون (سه سطح)، دمای اکستروژن (سه سطح) و قطر منفذ قالب (دو سطح) در سه تکرار انجام شد و داده‌های حاصل مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت. پس از تجزیه واریانس، مقایسه میانگین‌ها برای صفت‌های مورد بررسی با استفاده از آزمون Bonferroni در سطح اطمینان 95 درصد توسط نرم‌افزار Minitab 17 انجام شد. محاسبات و رسم نمودارها نیز با استفاده از نرم‌افزار Microsoft Excel 2010 انجام شد.

نتایج و بحث

با توجه به نتایج به‌دست آمده از آنالیز و مقایسه میانگین داده‌ها می‌توان اثر ترکیب خوراک و متغیرهای فرایند را بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی کف‌های جامد تولیدی به شرح زیر مورد بررسی قرار داد.

تاثیر شرایط فرایند بر رطوبت باقی‌مانده در نمونه‌ها

همان طور که در شکل 1 مشاهده می‌شود رطوبت باقی‌مانده در نمونه‌ها با افزایش درصد کنجد در ترکیب خوراک تا 20% کاهش و سپس افزایش نشان داد



شکل 1- تاثیر قطر منفذ قالب، درصد کنجد، دمای فرایند و سرعت چرخش ماردون بر رطوبت باقی‌مانده در نمونه‌ها

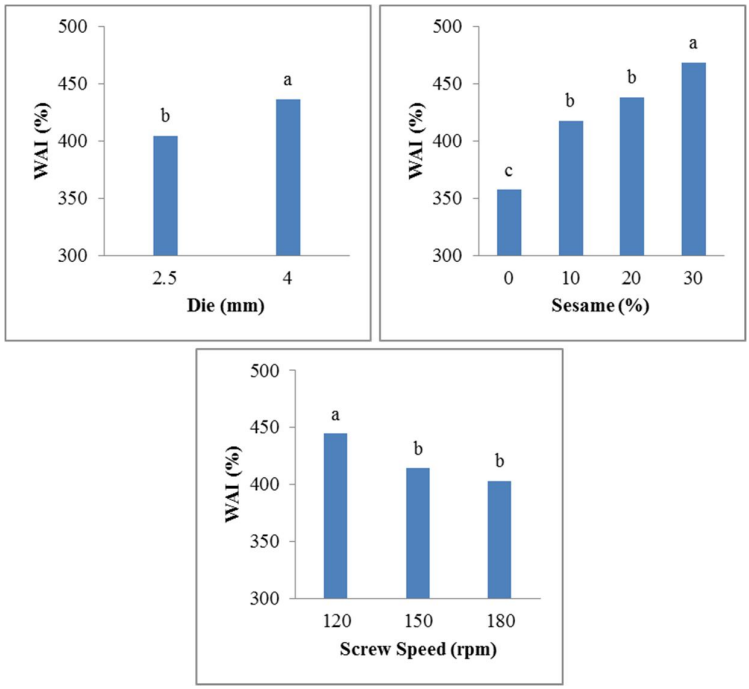
با افزایش درصد کنجد میزان چربی نمونه‌ها افزایش می‌یابد در نتیجه تمایل به نگهداری آب کمتر می‌شود اما اضافه شدن چربی از حدی بیشتر به دلیل ویژگی روان‌کنندگی می‌تواند موجب کاهش اثر فرایند بر تخریب نشاسته گردد، همچنین با بیشتر شدن کنجد میزان فیبر محصول افزایش می‌یابد و در نتیجه فراورده تمایل بیشتری به نگهداری رطوبت در خود دارد. میزان بالای ظرفیت نگهداری آب نشان‌دهنده میزان فیبر و نشاسته بیشتر آن نمونه می‌باشد (Deshpande *et al*., 2011).

تغییرات رطوبت باقی‌مانده در نمونه‌ها با قطر منفذ قالب هم جهت بود اما با دمای فرایند و سرعت چرخش ماردون خلاف جهت بود. O'Shea و همکاران (2014) نیز در پژوهش خود به اثر مخالف دمای فرایند و سرعت چرخش ماردون بر میزان رطوبت باقی‌مانده در فراورده اکسترود شده رسیدند. از آنجا که افزایش قطر منفذ قالب و کاهش سرعت چرخش ماردون باعث کاهش اختلاف فشار وارده بر مواد قبل و بعد از قالب و کاهش دمای فرایند باعث کاهش اختلاف دمای آنها می‌شود، خروج بخار آب از فراورده کمتر صورت می‌پذیرد. همچنین سرعت چرخش ماردون باعث ایجاد تنش برشی شده و این تنش برشی همراه با فشار بالا باعث از هم گسیخته شدن نشاسته و از بین رفتن شکل کریستالی آن می‌گردد، در نتیجه توانایی نگهداری آب کاهش می‌یابد (Harper *et al*., 1979; Onyango *et al*., 2004; Singh *et al*., 2015).

تاثیر شرایط فرایند بر شاخص جذب آب نمونه‌ها

با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل 2 مشاهده می‌شود که تغییرات شاخص جذب آب نمونه‌ها با درصد کنجد و قطر منفذ قالب هم جهت اما با سرعت چرخش ماردون خلاف جهت بود که این نتایج مشابه با گزارش Huang و همکاران (2014) بود. با افزایش درصد کنجد در ترکیب خوراک میزان پروتئین و فیبر نمونه‌ها افزایش می‌یابد که خاصیت جذب آب این دو ترکیب می‌تواند بر افزایش شاخص جذب آب نمونه‌ها با درصد کنجد بیشتر موثر باشد. همچنین افزایش کنجد، به دلیل اضافه شدن میزان چربی و درنتیجه افزایش روان کنندگی، می‌تواند مشابه با افزایش قطر منفذ قالب، باعث کاهش فشار وارده بر مواد درون اکسترودر شده و تخریب نشاسته و پروتئین کمتر صورت گیرد درنتیجه جذب آب این نمونه‌ها بیشتر می‌باشد. اما با افزایش سرعت چرخش ماردون، سرعت برشی افزایش یافته در نتیجه باعث تخریب پروتئین و نشاسته می‌گردد و میزان جذب آب کاهش می‌یابد (Moraru *et al*., 2003; Yagci *et al*., 2008; Brennan *et al*. 2012; Singh *et al*., 2015).

با بررسی نتایج مشخص شد دمای فرایند اعمال شده در این پژوهش تاثیر معنی‌داری ($p>0.05$) بر شاخص جذب آب نمونه‌ها نداشت.

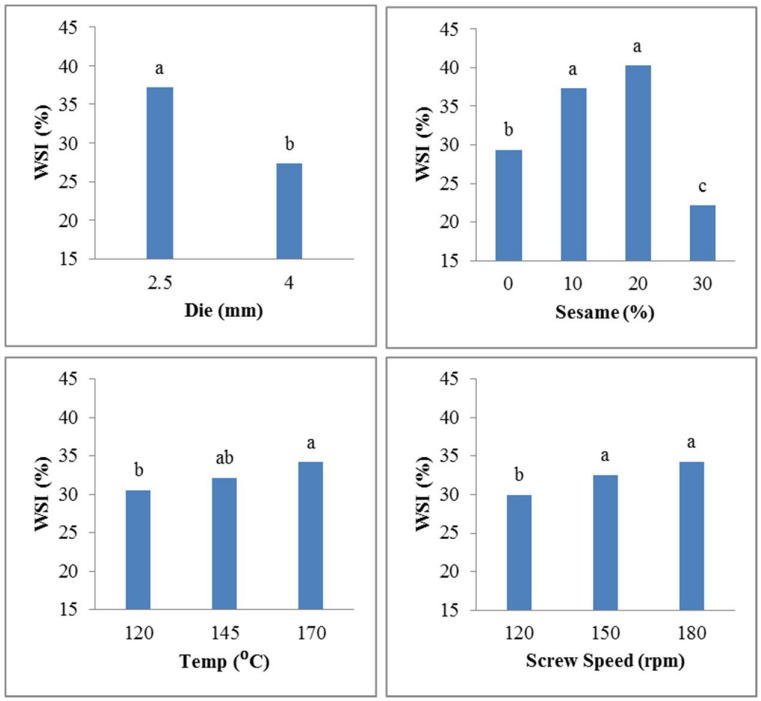


شکل 2- تاثیر قطر منفذ قالب، درصد کنجد و سرعت چرخش ماردون بر شاخص جذب آب نمونه‌ها

تاثیر شرایط فرایند بر شاخص انحلال در آب نمونه‌ها

شاخص انحلال در آب می‌تواند به‌عنوان شاخص از هم پاشیدگی و کاهش وزن ملکولی نشاسته و سایر ترکیبات و تبدیل آن به ملکول‌های محلول طی اکستروژن محسوب گردد (Sriburi *et al*., 2000; Lazou *et al*., 2010; Charunuch *et al*., 2014). همانطور که در شکل 3 مشخص است افزودن کنجد به ترکیب خوراک باعث افزایش شاخص انحلال در آب نمونه‌ها نسبت به کف‌های تهیه شده از نشاسته ذرت به تنهایی شد. هر چند این افزایش تا افزودن 20 درصد کنجد اتفاق افتاد و افزودن 30 درصد کنجد کاهش قابل ملاحظه‌ای در شاخص انحلال در آب نمونه‌ها نشان داد. دلیل افزایش این شاخص با افزودن کنجد به ترکیب خوراک می‌تواند افزایش میزان پروتئین و فیبر در فراورده باشد این نتایج مشابه گزارش Badrie و همکاران (1992) بود که با افزایش در میزان مخلوط آرد بادام زمینی و غلات مشاهده کردند که شاخص انحلال در آب افزایش یافت. Balasubramanian و همکاران (2012) نیز گزارش کرده‌اند که افزایش میزان پروتئین، باعث افزایش میزان شاخص انحلال در آب نمونه اکسترود شده می‌گردد. البته افزودن بیشتر کنجد (30 درصد) به دلیل افزایش میزان چربی مواد درون اکسترودر می‌تواند باعث روان‌کنندگی زیاد در اکسترودر شده، اثر فرایند را برای تخریب نشاسته و پروتئین کاهش دهد و در نتیجه شاخص انحلال در آب نمونه‌ها کاهش یابد (Moraru *et al*., 2003).

بررسی نتایج نشان داد شاخص انحلال در آب نمونه‌ها با افزایش قطر منفذ قالب کاهش یافت (شکل 3) اما افزایش سرعت چرخش ماردون همانند دمای فرایند باعث افزایش شاخص انحلال در آب نمونه‌ها شد. این رفتار بر خلاف تغییرات شاخص جذب آب نمونه‌ها می‌باشد که می‌تواند به دلیل تغییر میزان فشار وارده بر مواد در اکسترودر باشد که درنتیجه افزایش آن، تغییرات و شکستن نشاسته و پروتئین نیز افزایش می‌یابد و قابلیت حل شدن در آب بیشتر می‌شود (Moraru *et al*., 2003; Chanlat *et al*., 2011).

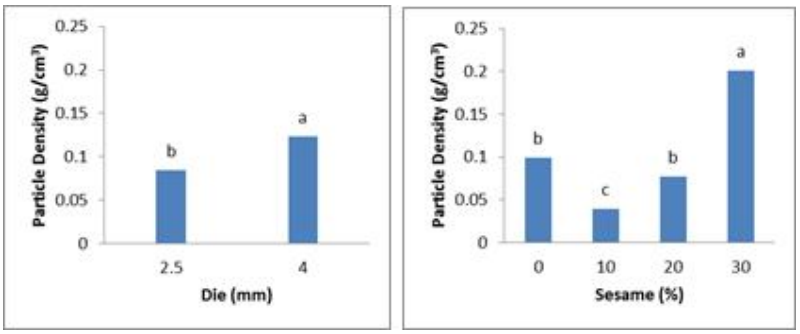


شکل 3- تاثیر قطر منفذ قالب، درصد کنجد، دمای فرایند و سرعت چرخش ماردون بر شاخص انحلال در آب نمونه‌ها

تاثیر شرایط فرایند بر چگالی ذره‌ای نمونه‌ها

همان طور که در شکل 4 مشاهده می‌شود چگالی ذره‌ای نمونه‌ها با اضافه شدن 10% کنجد به ترکیب خوراک کاهش و با ادامه روند افزایش درصد کنجد افزایش یافت هرچند فقط نمونه حاوی 30% کنجد چگالی ذره‌ای بیشتری از نمونه تهیه شده با نشاسته کامل داشت. افزودن کنجد باعث افزایش تنوع ترکیبات موجود در اکسترودر شده، با ایجاد برهمکنش بین آنها به ویژه پروتئین و نشاسته، شبکه قابل انبساطی ایجاد می‌شود و فراورده‌ای با چگالی کمتر بوجود می‌آید. با ادامه روند افزایش درصد کنجد در ترکیب خوراک و در نتیجه افزایش جایگزینی نشاسته با چربی، پروتئین و فیبر میزان کربوهیدرات کاهش یافت و تراکم کف افزایش پیدا کرد. با افزایش میزان چربی، اثر فشار وارده بر مواد داخل اکسترودر کاهش یافته، کف

متراکم‌تری پس از خروج مواد مذاب از منفذ قالب ایجاد می‌شود. Charunuch و همکاران (2014) افزایش میزان چگالی را همسو با افزایش فیبر در فراورده اکسترود شده گزارش کرده‌اند. همچنین Nikmaram و همکاران (2015) نیز روند افزایشی چگالی ذره‌ای را با افزایش میزان کنجد در فراورده گزارش کردند البته تفاوت در نتایج چگالی فراورده بدون کنجد این محققان با پژوهش حاضر می‌تواند به دلیل استفاده آنها از بلغور ذرت به جای نشاسته ذرت باشد که تنوع ترکیبات موجود در بلغور طبق موارد عنوان شده عامل کمتر بودن چگالی ذره‌ای فراورده بدون کنجد در یافته‌های این محققان می‌باشد.

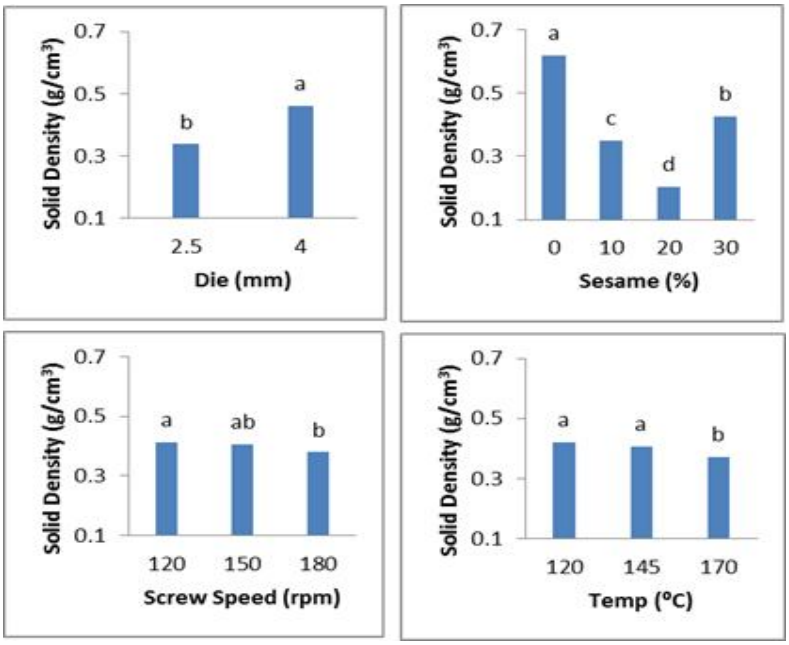


شکل 4- تاثیر قطر منفذ قالب و درصد کنجد بر چگالی ذره‌ای نمونه‌ها

با افزایش قطر منفذ قالب افزایش معنی‌داری ($p<0.05$) در چگالی ذره‌ای نمونه‌ها ایجاد شد (شکل 4) که می‌تواند به دلیل کاهش اختلاف فشار وارده بر مواد در قبل و بعد از قالب باشد که باعث افزایش حجم کمتری در فراورده می‌شود. طبق نتایج به‌دست آمده با شرایط مورد بررسی در این پژوهش، تغییرات دمای فرایند و سرعت چرخش ماردون اثر معنی‌داری ($p>0.05$) بر چگالی ذره‌ای نمونه‌ها نداشت.

تاثیر شرایط فرایند بر جامد واقعی نمونه‌ها

با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل 5 مشاهده می‌شود که چگالی جامد نمونه‌ها با افزودن کنجد به ترکیب خوراک کاهش یافت که می‌تواند به دلیل افزایش میزان چربی با چگالی کم در فراورده باشد.



شکل 5- تاثیر قطر منفذ قالب، درصد کنجد، دمای فرایند و سرعت چرخش ماردون بر چگالی جامد نمونه‌ها

هرچند نمونه حاوی 30% کنجد چگالی جامد بیشتری نسبت به نمونه‌های حاوی 10 و 20% کنجد داشت که دلیل آن می‌تواند از یک سو افزایش میزان فیبر و خاکستر و از سوی دیگر بیشتر شدن محتوای چربی و تاثیر کمتر فرایند بر تخریب نشاسته و پروتئین در نتیجه امکان نگهداری بیشتر رطوبت باشد.

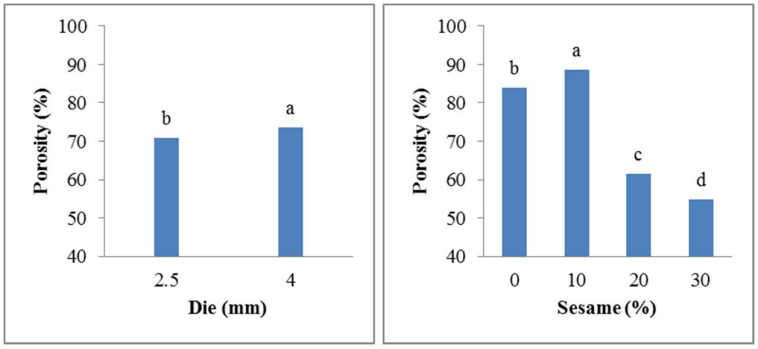
چگالی جامد نمونه‌ها با افزایش قطر منفذ قالب افزایش یافت (شکل 5). این افزایش به دلیل کاهش اختلاف فشار وارده بر مواد در قبل و بعد از قالب و در نتیجه خروج کمتر رطوبت از محصول می‌باشد، در حالیکه افزایش دمای فرایند و سرعت چرخش ماردون به طور معنی‌دار ($p<0.05$) باعث کاهش چگالی جامد نمونه‌ها شد. افزایش دمای فرایند باعث بالاتر بودن دمای مواد مذاب هنگام خروج از منفذ شده، رطوبت بیشتری از فراورده به صورت بخار خارج می‌شود. افزایش سرعت چرخش ماردون نیز باعث افزایش اختلاف فشار قبل و بعد از قالب شده و خروج رطوبت از فراورده را بیشتر می‌کند.

همانطور که مشاهده می‌شود روند تغییرات چگالی جامد نمونه‌ها (شکل 5) مطابق با رطوبت باقی‌مانده (شکل 1) و مخالف با شاخص انحلال در آب (شکل 3) آنها می‌باشد.

تاثیر شرایط فرایند بر تخلخل نمونه‌ها

همانطور که در شکل 6 مشاهده می‌شود، تخلخل کف‌های تولید شده با افزایش درصد کنجد در ترکیب خوراک تا 10 درصد افزایش یافته، سپس کاهش معنی‌داری ($p<0.05$) نشان داد. افزودن کنجد باعث افزایش تنوع ترکیبات موجود در اکسترودر شده و با ایجاد برهمکنش بین آنها به ویژه پروتئین و نشاسته، شبکه قابل انبساطی ایجاد می‌شود و فراورده‌ای با چگالی کمتر بوجود می‌آید. با ادامه روند افزایش درصد کنجد در ترکیب خوراک و در نتیجه افزایش محتوای چربی، اثر فشار وارده بر مواد داخل اکسترودر کاهش یافته، کف متراکم‌تری پس از خروج مواد مذاب از منفذ قالب ایجاد می‌شود. همچنین با افزایش درصد کنجد میزان فیبر نمونه افزایش می‌یابد و از آنجا که وجود موادی نظیر فیبرها که در شرایط اکسترودر به حالت غیرمحلول باقی می‌مانند باعث شکسته شدن حبابهای هوا شده، میزان انبساط کاهش می‌یابد (Lue *et al.*, 1991; Moraru *et al.*, 2003; Lazou *et al.*, 2010; Yadav *et al.*, 2013).

Yagci و همکاران (2008) در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که با افزایش میزان درصد آرد فندق مقداری چربی‌گیری شده، تخلخل نمونه فراورده اکسترود شده کاهش یافت.



شکل 6- تاثیر قطر منفذ قالب و درصد کنجد بر تخلخل نمونه‌ها

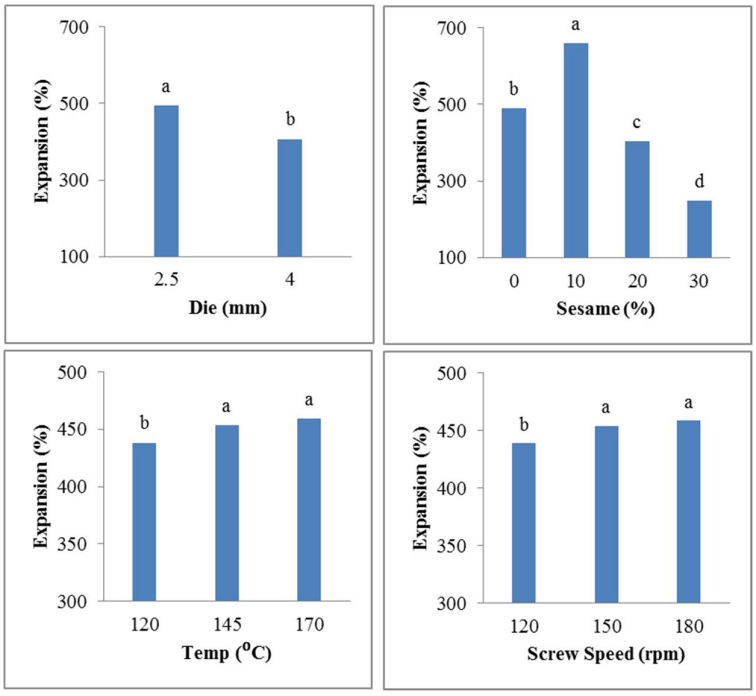
با مقایسه میانگین داده‌ها مشخص شد که با افزایش قطر منفذ قالب تخلخل افزایش یافت (شکل 6). هر چند با افزایش قطر منفذ هم چگالی ذره‌ای و هم چگالی جامد افزایش یافته است اما به دلیل افزایش بیشتر چگالی ذره‌ای، تخلخل نیز افزایش یافته است و به این معنی است که افزایش نگهداری رطوبت تاثیر بیشتری نسبت به کاهش اختلاف فشار قبل و بعد از قالب در شرایط این پژوهش داشته است. طبق نتایج به دست آمده با شرایط مورد بررسی در این پژوهش، تغییرات دمای فرایند و سرعت چرخش ماردون تاثیر معنی‌داری ($p>0.05$) بر تخلخل نمونه‌ها نداشتند.

تاثیر شرایط فرایند بر انبساط شعاعی نمونه‌ها

بررسی نتایج حاصل از پژوهش نشان داد روند تغییرات انبساط شعاعی نمونه‌ها با افزودن کنجد در ترکیب خوراک مشابه تغییرات تخلخل آنها می‌باشد (شکل 7) و دلایل آن نیز می‌تواند مشابه با موارد گفته شده در مورد تخلخل باشد. با افزایش بیش از 10 درصدکنجد در ترکیب خوراک به دلیل افزایش جایگزینی نشاسته با چربی، پروتئین و فیبر میزان کربوهیدرات کاهش یافت که در کنار افزایش میزان چربی سبب انبساط کمتر در کف‌ها شد. Nikmaram و همکاران (2015) نیز روند افزایشی انبساط شعاعی فراورده اکسترود شده را با افزایش میزان کنجد گزارش کردند. افزایش میزان پروتئین در فرایند اکستروژن بر میزان توزیع آب در ماتریکس بین سلولی و افزایش میزان پیوند بین ترکیبات اثر می‌گذارد همچنین افزایش فیبر باعث جذب و حفظ آب بیشتر می‌شود که این عوامل سبب کاهش میزان انبساط‌پذیری محصول شده، مانع از پف کردن نمونه می‌گردد. از

سویی پروتئین و چربی باعث کاهش تنش برشی در دستگاه اکسترودر می‌گردد و بنابراین باعث کاهش فشار ماردون و کاهش اختلاف فشار بین داخل اکسترودر و اتمسفر می‌گردد (Moraru *et al*., 2003; Charunuch .O'Shea *et al*., 2014) و همکاران (2014) نیز گزارش کرده‌اند که فیبرهای موجود در مخلوط موجب کاهش حل شدن نشاسته گردیده، باعث کاهش میزان پف‌کردگی فراورده می‌شود.

همان‌طور که در شکل 7 مشاهده می‌شود با افزایش قطر منفذ قالب انبساط شعاعی نمونه‌ها کاهش پیدا کرد. که علت آن می‌تواند کمتر بودن فشار ایجاد شده در قالب با قطر منفذ بیشتر نسبت به قالب با قطر منفذ کمتر باشد. انبساط شعاعی نمونه‌ها با افزایش سرعت چرخش ماردون همانند دمای فرایند افزایش یافت. افزایش سرعت چرخش ماردون باعث افزایش اختلاف فشار قبل و بعد از منفذ و اصطکاک درون اکسترودر شده و افزایش دمای فرایند نیز باعث افزایش دمای مایع فوق داغ درون اکسترودر می‌گردد در نتیجه خروج بخار آب سریعتر انجام می‌شود و افزایش انبساط در نمونه به‌وجود می‌آید. Onyango و همکاران (2004) گزارش کرده‌اند که افزایش سرعت چرخش ماردون باعث افزایش نیروی مکانیکی و افزایش دمای مخلوط آرد و در نتیجه افزایش الاستیسیته محصول اکسترود شده گردیده، در نهایت باعث افزایش میزان انبساط نمونه می‌شود.



شکل 7- تاثیر قطر منفذ قالب، درصد کنجد، دمای فرایند و سرعت چرخش ماردون بر انبساط شعاعی نمونه‌ها

همبستگی بین صفات مورد بررسی

نتایج همبستگی بین صفات اندازه‌گیری شده در جدول 1 ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود همبستگی بالایی بین اکثر صفات وجود دارد، هرچند بین رطوبت باقی‌مانده و شاخص جذب آب، همچنین بین شاخص انحلال در آب و تخلخل و نیز بین چگالی جامد و انبساط شعاعی نمونه‌ها همبستگی معنی‌داری ($p>0.01$) به‌دست نیامد. با توجه به نمودارهای ارائه شده به دلیل تاثیر زیاد ترکیب خوراک بر این صفات، عدم همبستگی بین آنها دور از انتظار نمی‌باشد. بسیاری از پژوهشگران دیگر نیز همبستگی مشابهی بین صفات مورد بررسی در این پژوهش گزارش کرده‌اند (Rayas-Duarte *et al*., 1998; Plews *et al*., 2009; Yadav *et al*., 2013).

نتیجه‌گیری

همانطور که عنوان شد ترکیب خوراک و شرایط فرایند می‌تواند بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی کف‌های تولیدی تشکیل شده از دانه کنجد و نشاسته ذرت به روش اکستروژن تاثیر زیادی داشته باشد.

افزودن مقداری دانه کنجد به نشاسته ذرت در فرایند اکستروژن می‌تواند به دلیل ایجاد تنوع در ترکیبات (چربی، پروتئین و فیبر) و تمایل به برهمکنش آنها با یکدیگر باعث افزایش شاخص جذب آب، شاخص انحلال در آب، تخلخل و انبساط شعاعی کف‌ها و کاهش چگالی و میزان رطوبت باقی‌مانده آنها شود، هر چند افزودن بیش از اندازه کنجد به‌ویژه به دلیل روان‌کنندگی چربی و در نتیجه کاهش فشار وارده بر مواد می‌تواند اثرات مخالف بر کف‌ها ایجاد کند.

افزایش قطر منفذ قالب با کاهش فشار وارده بر مواد درون اکسترودر می‌تواند باعث افزایش میزان رطوبت باقی‌مانده، شاخص جذب آب، چگالی و تخلخل کف‌ها و کاهش شاخص انحلال در آب و انبساط شعاعی آنها شود.

افزایش دمای فرایند با تشدید اختلاف دمای مواد مذاب قبل و بعد از قالب، همچنین افزایش برهمکنش بین ترکیبات، سیالیت مواد درون اکسترودر و تغییرات فرایندی پخت می‌تواند باعث افزایش شاخص انحلال در آب و انبساط شعاعی کف‌ها و کاهش میزان رطوبت باقی‌مانده و چگالی جامد آنها شود.

افزایش سرعت چرخش ماردون با افزایش فشار و کاهش اثر دما بر مواد درون اکسترودر می‌تواند باعث افزایش شاخص انحلال در آب و انبساط شعاعی کف‌ها و کاهش میزان رطوبت باقی‌مانده، شاخص جذب آب و چگالی جامد آنها شود.

در کل می‌توان چنین بیان کرد عوامل فرایندی که باعث افزایش انرژی اعمال شده بر مواد درون اکسترودر می‌شوند شاخص انحلال در آب و انبساط کف‌ها را افزایش و میزان رطوبت باقی‌مانده، شاخص جذب آب و چگالی آنها را کاهش می‌دهند. در نتیجه با انتخاب درست نوع و میزان مواد تشکیل دهنده خوراک برای ایجاد تناسب در تنوع ترکیبات و تعیین شرایط مناسب فرایندی می‌توان با استفاده از مواد اولیه در اختیار، کف‌های جامد غذایی با ویژگی دلخواه به روش اکستروژن تولید کرد.

جدول 1- همبستگی بین صفات رطوبت باقی‌مانده، شاخص جذب آب، شاخص انحلال در آب، چگالی ذره‌ای، چگالی جامد، تخلخل و انبساط شعاعی کف‌های تولیدی

	Moisture	WAI	WSI	Particle Density	Solid Density	Porosity
WAI	0.111^{ns}					
WSI	-0.730^{**}	-0.330^{**}				
Particle Density	0.474^{**}	0.234^{**}	-0.603^{**}			
Solid Density	0.714^{**}	-0.285^{**}	-0.565^{**}	0.310^{**}		
Porosity	0.232^{**}	-0.403^{**}	0.115^{ns}	-0.653^{**}	0.378^{**}	
Expantion	-0.226^{**}	-0.249^{**}	0.555^{**}	-0.715^{**}	-0.120^{ns}	0.697^{**}

اعداد مربوط به همبستگی پیرسون می‌باشد.

** معنی‌داری در سطح خطای 1% و ns عدم وجود اختلاف معنی‌دار

تشکر و قدردانی

به این وسیله از پژوهشکده علوم و فناوری مواد غذایی سازمان جهاددانشگاهی خراسان رضوی که امکانات اجرای پژوهش را در اختیار گذاشت قدردانی می‌شود.

منابع

Association of Official Analytical Chemists, AOAC (1990). Official Methods of Analysis (15th ed.). Washington, DC.

Badrie, N. & Mellowes, W.A., 1992, Soybean flour/oil and wheat bran effects on characteristics of cassava (Manihot esculenta Crantz) flour extrudates. *Journal of Food Science*, 57, 108–111.

Balasubramanian. S., Borah. A., Singh, K.K. & Patil, R.T.T., 2012, Effect of selected dehulled legume incorporation on functional and nutritional properties of protein enriched sorghum and wheat extrudates. J*ournal of Food Science and Technology*. 49(5), 572–79.

Brennan, A., Menard, C., Roudaut, G. & Brennan, C.S., 2012, Amaranth, millet and buckwheat flours affect the physical properties of extruded breakfast cereals and modulate their potential glycaemic impact. *Journal of Starch Starke*, 64, 392–400.

Chanlat, N., Songsermpong, S., Charunuch, C. & Naivikul, O., 2011, Twin-screw extrusion of pre-germinated brown rice: physicochemical properties and γ- aminobutyric acid content (gaba) of extruded snacks. *International Journal of Food Engineering*, 7, 1-18.

Charunuch, C., Limsangouan, N., Prasert, W. & Wongkrajang, K.T., 2014, Optimization of extrusion conditions for ready-to-eat breakfast cereal enhanced with defatted rice bran. *International Food Research Journal*, 21(2), 713-722.

Deshpande, HW. & Poshadri, A., 2011, Physical and sensory characteristics of extruded snacks prepared from Foxtail millet based composite flours. *International food research journal*, 18(2), 751-756.

Harper, J.M. & Clark, J.P., 1979, Food extrusion. CRC Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 11(2), 155-215.

Huang, J., Lui, W.B. & Peng, J., 2014, Effects of screw speed and sesame cake level on optimal operation conditions of

expanded corn grits extrudates. *International Journal of Food Engineering*, 10(2), 317–328.
Kalin, F., 1979, Wheat gluten applications in food products. *Journal of American Oil Chemistry Social*, 56, 477–479.
Lazou, A. and Krokida, M., 2010, Functional properties of corn and corn–lentil extrudates. *Food Research International*, 43, 609–616.
Lue, S. & Huff, H.E., 1991, Extrusion cooking of corn meal and sugar beet fiber: effects on expansion properties, starch gelatinization, and dietary fiber content. *Cereal Chemistry*, 68(3), 227-34.
Moraru, C.I. & Kokini, J.L., 2003, Nucleation and expansion during extrusion and microwave heating of cereal foods. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2, 120–138.
Nam, S., 2002, Extrusion technology for the development of barley cereal products and bioactive packaging materials. M.Sc. thesis, University of Manitoba, Canada.
Namiki, M., Kobayashi, T. & Hara, H., 2001, Process of producing sesame lignans and/or sesame flavour. US patent No. 6278005 B1.
Nikmaram, N., Garavand, F., Elhamirad, A., Beiraghi-toosi, S. & Goli-movahhed, G., 2015, Production of high quality expanded corn extrudates containing sesame seed using response surface methodology, *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 7(5), 713-720.
O'Shea, N., Arendt, E. and Gallagher, E., 2014, Enhancing an extruded puffed snack by optimising die head temperature, screw speed and apple pomace inclusion. *Food and Bioprocess Technology*, 7, 1767–1782.
Onyango, C., Henle, T., Ziems, A., Hofmann, T. & Bley, T., 2004, Effect of extrusion variables on fermented maize–finger millet blend in the production of uji. LWT- *Food Science and Technology*, 37(4), 409–415.
Plews, A.G. & Atkinson, A., 2009, Control of porosity and expansion in starch extrusion by monitoring pressure at die outlet. *Journal of Cellular Plastics*, 45, 67-82.
Rayas-Duarte, P., Majewska, K. & Doetkott, C., 1998, Effects of extrusion process parameters on the quality of buckwheat flourmixes. *Cereal Chemistry*, 75, 338–345.
Singh, B., Rachna, Hussain, S.Z. & Sharma, S., 2015, Response surface analysis and process optimization of twin screw extrusion cooking of potato-based snacks. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(3), 270-281.
Sriburi, P. & Hill, S.E., 2000, Extrusion of cassava starch with either variations in ascorbic acid concentration or pH. *International Journal of Food Science and Technology*, 35, 141-154.
Ushakumari S.R., Latha S. & Malleshi, N.G., 2004, the functional properties of popped, flaked, extruded and roller-dried foxtail millet (*Setaria italica*). International Journal of Food Science and Technology, 39, 907–915.
Yadav, D.N., Anand, T., Navnidh, I. & Singh., A.K.T., 2013, Co-extrusion of pearl millet-whey protein concentrate for expanded snacks. *International Journal of Food Science and Technology*, 49, 840–846.
Yağci, S. & Göğüş, F., 2008, Response surface methodology for evaluation of physical and functional properties of extruded snack foods developed from food-by-products. *Journal of Food Engineering*, 86, 122–132.

Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 14, No. 5, Dec- Jan 2019, p. 865-876

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد 14، شماره 5، آذر- دی 1397، ص.876- 865

Effect of feed mixture and process variables on physicochemical properties of solid foams made from corn starch and sesame seed by extrusion

Sh. Beiraghi-Toosi[1], M. Mohebbi[2*], M. Varidi[3]

Received: 2018.02.12
Accepted: 2018.07.07

Introduction: Extrusion is one of the technologies used for solid foams production. In this process, pressure is the most important parameter and the most important variables affecting pressure are feed mixture, die diameter, barrel temperature and screw speed. A reduction of die diameter or plasticizer contents such as moisture and fats in the feed mixture or an increase in the screw speed or barrel temperature can increase the extruder barrel pressure. Also, the increased barrel temperature, in addition to changing cooking properties, escalates the temperature difference inside and outside of the die, raising the rate and amount of evaporation from melted mixtures, therefor affecting the solid foam structure and characteristics. On the other hand, the type and amount of feed mixture components are key factors affecting the extrudate properties (Moraru *et al*., 2003; Plews *et al*., 2009; O'Shea *et al*., 2014).

Sesame seed is one of the ancient edible oil seeds used in many food products. In addition to oil, it contains carbohydrate, protein and fiber (Namiki *et al*., 2001) which can provide a variety of compounds in the feed mixture to change the properties of foam. This study investigates the effect of partial replacement of corn starch with edible oil seed containing a mixture of various compounds and the effect of the extrusion process on the changes in the physicochemical properties of the produced solid foam relative to the foam produced from corn starch. In this regard, different proportions of sesame seeds were added to the corn starch with specific moisture contents, and following the application of the extrusion process, the effect of feed mixture, operation temperature, screw speed and die diameter on physicochemical properties of solid foams was evaluated.

Materials and methods: Solid foams made from corn starch with 0, 10, 20 and 30 percent of sesame seed in the formulation and 15 percent of moisture content were processed in a co-current twin-screw extruder at a screw speed of 120, 150 and 180 rpm, a barrel temperature of 120, 145 and 170°C, a die diameter of 2.5 and 4 mm, and a constant feed rate of 40 kg per hour. A completely randomized design was employed to investigate the effect of these variables on chemical and physical properties of extruded products. The moisture content of samples was measured using oven method at 105°C (AOAC, 1990). Water absorption and water solubility indices were measured through solving the sample powder in distilled water, which was followed by centrifuging, weighing gel, drying supernatant and weighing dried matter (Singh *et al.*, 2015; Huang *et al.*, 2014). In addition, particle density was measured using the rapeseed displacement method (Singh *et al.*, 2015) and solid density was calculated by the weight /volume ratio of the sample powder, as measured by the gradient cylinder (Ushakumari *et al*., 2004; Yagci *et al*., 2008). The porosity of samples was measured in terms of the ratio of particle density to solid density (Plews *et al*., 2009; O'Shea *et al*., 2014) and the radial expansion ratio was calculated in terms of the ratio of sample diameter, as measured by the caliper, to die diameter (Chanlat *et al.*, 2011; Huang *et al.*, 2014).

Results and discussion: Results showed that adding 10% sesame seed, due to the variety of compounds and their increased interactions, produced foams of maximum expansion and porosity, and minimum particle density. Adding 30% sesame seed had an opposite effect due to increased fat content and reduced pressure effect on the melted mixture in the barrel. Moreover, increased die diameter demonstrated augmented residual moisture content, water absorption index, density and porosity, as well as decreased water solubility index and expansion ratio of solid foams caused by pressure reduction on the melted mixture in the barrel. The increased barrel temperature was associated with greater

1. PhD student, Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
Assistant professor, Food Processing Research Department, Food Science and Technology Research Institute, ACECR-Khorasan Razavi Branch, Mashhad, Iran.
2. Professor, Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
3. Assosiate Professor, Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
(*Corresponding Author Email: mohebbi@um.ac.ir)

changes in cooking, escalated temperature difference between inside and outside of the die and production of foams with higher water solubility index and expansion ratio, as well as lower residual moisture content, water absorption index and solid density. The higher screw speed increased the applied energy, and despite decreasing the time of temperature effect, produced foams with properties comparable to those caused by temperature increase.

In general, it can be stated that the process factors that raise the energy applied to the extrusion material leads to the increased water solubility index and the expansion ratio of the solid foams and decreased residual moisture, water absorption index and density. Consequently, by selecting the right type and amount of feed mixture to create proportions in various compounds and determine the appropriate process conditions, solid foams with desired properties can be produced by means of extrusion using available raw materials.

Keywords: Extruder, Operation temperature, Screw speed, Die, Residual moisture, Density, Expansion.