

بررسی تاثیر شرایط فرایند سرخ کردن بر جذب روغن و محاسبه ضریب انتشار موثر رطوبت در فرایند سرخ کردن عمیق فیش فینگر

سید حسین ایزدی^۱، زهرا امام جمعه^{۲*}، سهراب معینی^۲، غلامرضا عسکری^۳

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲- استاد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۳- استادیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۴/۰۱/۲۵ تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۳/۰۶)

چکیده

در این تحقیق تاثیر شرایط سرخ کردن عمیق اعم از دمای روغن، زمان فرایند و ضخامت محصول (فیش فینگر) بر خروج آب و جذب روغن مورد بررسی قرار گرفت. آزمایشات در دماهای ۱۶۰، ۱۷۵ و ۱۹۰ درجه سلسیوس و در بازه زمانی ۱ تا ۶ دقیقه با فواصل یک دقیقه‌ای انجام شد و پروفیل جریان، ارتباط جذب روغن با خروج آب و مکانیسم هر یک مطالعه گردید. در ادامه ضریب دیفوزیون موثر آب طی سرخ کردن نمونه‌های فیش فینگر در دماهای مختلف اندازه‌گیری شد و با استفاده از رابطه آرنیوس، ارتباط ضرایب و تاثیر دما بر ضریب دیفوزیون موثر آب، همچنین انرژی اکتیواسیون فرایند محاسبه گردید. پروفیل جذب روغن در دماهای مختلف نشان داد که بیشترین میزان جذب روغن در لایه‌های سطحی محصول رخ داده است. بررسی‌ها نشان داد که در سرخ کردن عمیق فیش فینگر، ارتباط تنگاتنگی بین خروج آب محصول و جذب روغن وجود داشته و با افزایش خروج آب، بر جذب روغن افزوده شده است. همچنین افزایش دما به واسطه افزایش خروج آب تاثیر مستقیمی بر جذب روغن داشته است.

کلید واژگان: جذب روغن، سرخ کردن عمیق، ضریب انتشار موثر، فیش فینگر

* مسئول مکاتبات: emamj@ut.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه مصرف ماهی و فراورده‌های دریایی در جوامع پیشرفته از اهمیت بسیاری برخوردار است. جدا از نگهداری ماهی از طریق انجماد، کنسرواسیون و دودی کردن، ماهی را می‌توان به بعضی از فرآورده‌های آماده غذایی نظیر فیش فینگر، کیک ماهی و برگر ماهی نیز تبدیل نمود. فیش فینگر یکی از فراورده‌های لذیذ ماهی است که از قالب‌های منجمد فیله ماهی تهیه می‌شود. برای تهیه آن، خمیر ماهی را به صورت قطعات مکعب مستطیل قالب نموده و پس از اضافه کردن کرامب (پوشش سوخاری قطعات) دوباره منجمد می‌کنند. این فراورده، محصولی با وزن کمتر از ۵۰ گرم و بیشتر از ۲۰ گرم که طول آن بیشتر از ۳ برابر عرض آن است و ممکن است از یک قطعه یا مخلوطی از ماهیان با مشخصه‌های یکسان به صورت ترکیب تهیه شود [۱].

هم اکنون بیشترین میزان مصرف ماهی در جهان به صورت ماهی سرخ شده است. سرخ کردن به عنوان رایج‌ترین عملیات فراوری در تهیه غذاهای آماده قلمداد می‌گردد [۲ و ۳]. افزایش محتوای روغن سرخ کردنی، در فراورده‌ای که غالباً به دلیل اثرات سلامتی بخش اسیدهای چرب چند غیر اشباعی خود مورد توجه است، عاملی بسیار نامطلوب به حساب می‌آید و این خود به تنهایی اهمیت کنترل جذب روغن در سرخ کردن چنین فراورده‌هایی را بروز می‌دهد. برای کاهش هرچه بیشتر جذب روغن در این فراورده‌ها، درک صحیحی از عملیات سرخ کردن لازم است. همواره عامل کنترل کننده فرایندهای انتقال جرم و حرارت هنگام سرخ کردن، انتقال حرارت از سطح محصول است و سرعت تبخیر با اختلاف دمای بین روغن و نقطه جوش آب متناسب است [۴]. تبخیر باعث ایجاد فضای خالی در ماتریس جامد ماده غذایی شده و علاوه بر این منجر به بهم خوردن تعادل فشار داخلی و خارجی، (پس از خروج ماده غذایی از سرخ کن وافت دمای آن) می‌شود [۵]. در ابتدای فرایند سرخ کردن فشار داخلی بالای ۴۵ کیلو پاسکال، مانع از مهاجرت روغن به درون محصول می‌شود [۶]. کندانس بخار در حال تعادل با ماتریس جامد بر اثر سرد شدن سریع پوسته باعث کاهش فشار داخلی تا زیر ۳۵ کیلو پاسکال می‌گردد. کاهش فشار بستگی به چگالی ظاهری و تخلخل مواد و مقاومت روغن بستگی به ویسکوزیته و تخلخل

ایجاد شده بر اثر خروج آب دارد. هنگام فرآیند، زمانی که هنوز میزان زیادی آب آزاد در محصول وجود دارد (آب آزادی که مستعد جوشش و خروج از ماده است)، فرار آب و ایجاد فشار داخلی در ماده غذایی، مانع جذب روغن می‌شود. در مقابل زمانی که محصول از سرخ کن خارج می‌شود، دمای هسته کم شده، بخار کندانس می‌شود و فشار داخل محصول به صورت ناگهانی کاهش می‌یابد. اختلاف فشار فاحش داخل و خارج محصول باعث ایجاد خلا و در نتیجه مکش روغن سطح به داخل محصول می‌شود [۷ و ۸]. با توجه به مطالب ذکر شده می‌توان دریافت که برای بررسی و کنترل جذب روغن در فرایند سرخ کردن عمیق مواد غذایی، شناخت کامل از روند نفوذ آب در محصول و خروج آن ضروری است. علاوه بر تاثیر مستقیم خروج آب بر جذب روغن، خروج بخشی از مواد محلول در آب به همراه آب دفع شده و از دست رفتن آن و تاثیر آب به همراه این مواد در حرارت بالا بر کیفیت روغن سرخ کردنی، اهمیت بررسی خروج آب را دو چندان می‌کند. در بین تعاریف و مفاهیم پدیده انتشار، ضریب دیفوزیون نقش نمایندگی سرعت انتقال جرم ماده را در شرایط عمل ایفا می‌کند و در طراحی فرایندها تخمین شرایط ماده کاربرد اساسی دارد. در این تحقیق از طریق حل عددی، ضرایب دیفوزیون رطوبت در دماهای مختلف سرخ کردن و ارتباط آنها با دمای روغن سرخ کردنی مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تهیه نمونه و انجام آزمایشات

جهت انجام آزمایشات از نمونه‌های بدون کرامپ (پوشش سوخاری) استفاده شد. نمونه‌های فیش فینگر تولید شده از ماهی هوکی (تهیه شده از کارخانه‌ی فراورده‌های غذایی مارین، کرج، ایران) در بسته بندی‌های ۵۰۰ گرمی تهیه شد. به منظور یکسان بودن میزان رطوبت نمونه‌ها برای هر تکرار از آزمایشات از بسته های جدید استفاده شد. برای یکنواختی و حصول اطمینان از همگن بودن نمونه‌ها، فیش فینگر پس از یخزدایی به صورت خمیر اولیه ورز داده شد و سپس توسط قالبی که از قبل تهیه شده بود، به صورت همگن و در اندازه‌های یکسان در ابعاد ۶×۲×۲ سانتی‌متر قالب‌گیری شد. نمونه‌های فیش فینگر در سه دمای ۱۶۰

نامحدود به شکل زیر است:

$$M^*(m) = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-(2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff} t}{L^2}\right] \quad (2)$$

در این رابطه M^* رطوبت بدون بعد، M رطوبت در زمان t ، M_0 رطوبت اولیه، M_e رطوبت تعادلی و L ضخامت ماده غذایی بر حسب متر است.

۲-۳- محاسبه ضریب انتشار موثر

این روش که بطور متمادی توسط پژوهشگران مورد استفاده قرار گرفته است، بر پایه حل معادله ۲، (حل تحلیلی رابطه ۱ برای یک صفحه بی انتها) قرار دارد. ضریب انتشار بطور قابل توجهی به تغییرات مقدار رطوبت وابسته است [۱۲ و ۱۳]. با رسم تغییرات نسبت بدون بعد رطوبت (که از داده‌های آزمایشی بدست آمده) در برابر زمان در یک صفحه نیمه لگاریتمی، می‌توان ضریب انتشار را با استفاده از روش زیر به دست آورد. این منحنی طی مرحله نخست سرعت نزولی انتقال، حالتی خطی دارد و شیب این بخش خطی در مورد مختصات صفحه‌ای معادل $\pi^2 D_{eff}/L^2$ است و از این طریق می‌توان ضریب انتشار را محاسبه کرد. مقدار L که نصف ضخامت صفحه است در ابتدای فرآیند اندازه‌گیری شد. همچنین از مقاومت سطحی صرفنظر شده و رطوبت تعادلی بسیار کوچک و نزدیک صفر در نظر گرفته شد [۱۴ و ۱۵]. در بسیاری موارد می‌توان حل معادله ۲ را با احتساب اولین جمله سری آن، تخمین زد، با این شرط که عدد فوریر (Dt/L^2) کمتر از ۰/۰۵ باشد [۱۱]. در این صورت شرایط مرزی و اولیه برای حل معادله به صورت زیر است:

$$t=0, 0 < x < L \quad M=M_0 \quad (3)$$

$$t>0, x=0, \quad \frac{\partial M}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

$$t>0, x=L, \quad M=M_e \quad (5)$$

و معادله ۲ به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\ln \frac{\bar{M} - M_e}{M_0 - M_e} = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{L^2} \quad (6)$$

تاثیر دما بر ضریب انتشار

هر چه دمای عملیاتی در فرآیند سرخ کردن بالاتر باشد، ضریب انتشار رطوبت افزایش می‌یابد. تاثیر دما بر این پارامتر با استفاده از معادله معروف آرنیوس نشان داده می‌شود [۱۶].

۱۷۵ و ۱۹۰ درجه‌ی سلسیوس و در زمان‌های ۱ تا ۶ دقیقه با فاصله زمانی یک دقیقه در یک سرخ‌کن خانگی (مدل Delonghi, F18436 ساخت کشور ایتالیا) و روغن آفتابگردان (تهیه شده از کارخانه مواد غذایی اویلا. اشتهارد، ایران) سرخ شدند. سپس برای بررسی حرکت روغن و رطوبت در داخل محصول، نمونه‌های سرد شده، در چهار نقطه، از مرکز تا لبه کوچکترین بعد (هر قطعه به ضخامت ۲ میلی‌متر) برش داده شد. برای اندازه‌گیری محتوای آب نمونه‌ها از یک آون (مدل Heraeus, Mo 360 ساخت کشور آلمان)، مطابق روش AACC [۹]، استفاده شد. همچنین محتوای روغن با استفاده از دستگاه سوکسله (مدل Buchi, 810 ساخت کشور سوئیس) و روش AOAC [۱۰]، توسط حلال هگزان (تهیه شده از شرکت Merck آلمان) اندازه‌گیری شد.

۲-۲- ضریب انتشار موثر

عملیات انتقال جرم در برگزیده انتقال ماده از یک محیط به محیط دیگر است. یکی از فرآیندهای شاخص انتقال جرم در مواد غذایی، عملیات سرخ کردن است. سرخ کردن عملیاتی است که در آن همزمان فرآیندهای انتقال جرم روغن و رطوبت در حال انجام است. هنگامی که مکانیسم‌های مختلف درگیر یک فرآیند هستند بطور روشن نمی‌توان نقش و تاثیر هر کدام بر روی ضریب انتشار را بطور جداگانه مورد بررسی قرار داد. در اینگونه موارد سرعت حرکت، با ضریب انتشار موثر (D_{eff}) بیان می‌شود. ضریب انتشار موثر بدون در نظر گرفتن مکانیسم انتقال جرم بیان می‌گردد. بطور معمول قانون دوم فیک برای توصیف فرآیند انتقال مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۱].

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 M \quad (1)$$

در این رابطه M کیلوگرم رطوبت موضعی به کیلوگرم ماده خشک، t زمان (ثانیه) و (D_{eff}) ضریب انتشار موثر (m^2/s) است.

در بیشتر موارد در مواد غذایی که توزیع ماده یکنواخت و ابعاد متقارن است، انتقال را در جهت یک بعد در نظر می‌گیرند و معمولاً از مقاومت خارجی در برابر حرکت صرفنظر می‌شود. حل رابطه‌ی بالا در شکل‌های هندسی مختلف با استفاده از شرایط اولیه و مرزی مورد اشاره در بالا توسط کرانک در سال ۱۹۷۵ ارائه شده است [۱۱]. حل قانون دوم فیک برای یک صفحه

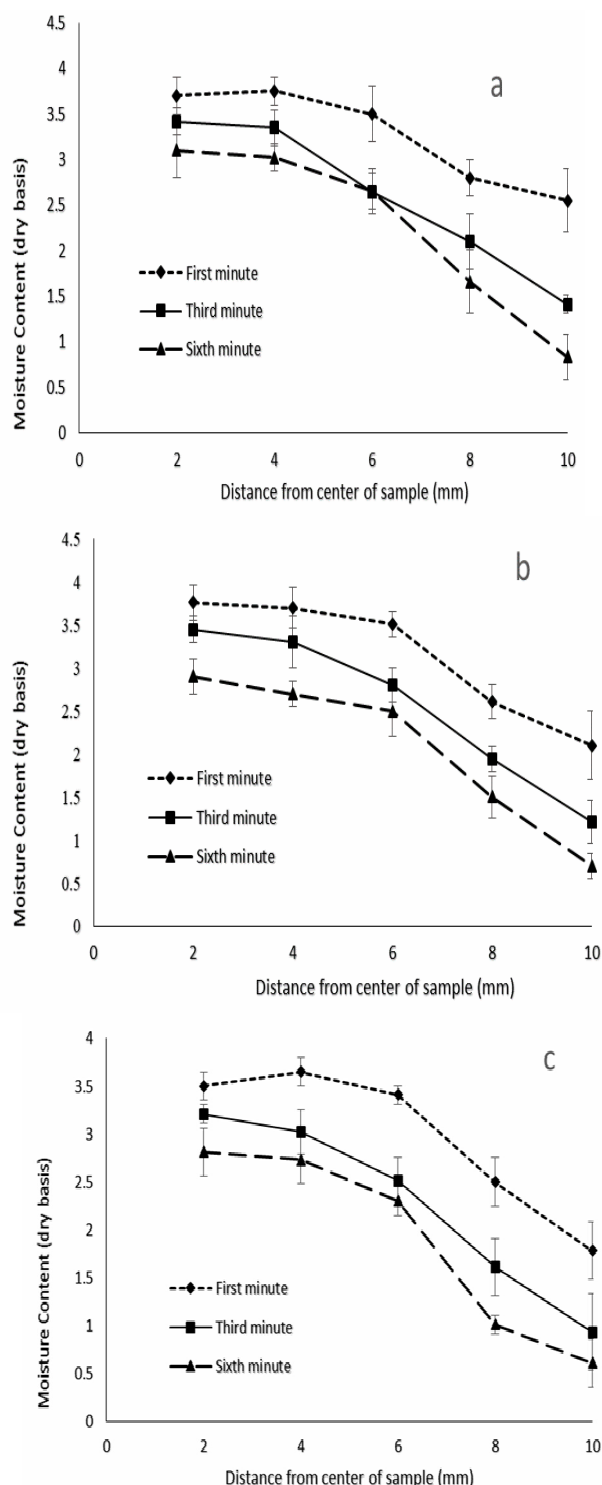


Fig 1 Moisture content changes of fish finger samples at different temperatures. (a) 160 °C (b) 175 °C (c) 190 °C

در حقیقت با افزایش زمان، آب بیشتری از نمونه خارج می‌شود ولی سرعت خروج آب کاهش می‌یابد، این امر به دلیل سخت

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (7)$$

در اینجا D_0 مقدار مبنا است و بیشتر بستگی به ویژگی‌های فیزیکی ماده مورد آزمایش دارد. E_a انرژی فعال‌سازی نفوذ رطوبت (kJ/kg.mol) است که به خصوصیات شیمیایی ماده مورد نظر بستگی دارد، R ثابت گازها (۸/۳۱۴ kJ/kg.mol.K) و T دمای مطلق (K) است. انرژی فعال‌سازی را می‌توان با رسم $(\ln D_{eff})$ در برابر $(1/T)$ بدست آورد [۱۴، ۱۵ و ۱۷].

۳- نتایج و بحث

۳-۱- خروج آب

در فرایند سرخ کردن، نفوذ روغن در نمونه وابسته به خروج آب محصول است. میزان زیادی از جذب روغن بلافاصله پس از سرخ کردن، طی سرد کردن صورت می‌گیرد [۵]. به عبارت دیگر روغن جانشین آب خارج شده از محصول می‌گردد. فشار داخلی، میزان آب خارج شده و باقی مانده در محصول و فشار مویرگی، در کنار اختلاف غلظتی که باعث انتشار دیفوزیونی روغن است، از جمله عوامل تاثیر گذار در نفوذ روغن می‌باشد. بنابراین از آنجا که در فرایند سرخ کردن عمیق، پدیده‌های خروج رطوبت و نفوذ روغن ارتباط تنگاتنگی با هم دارند، برای تحقیق روند جذب روغن طی سرخ کردن، بررسی تغییرات آب محصول الزامی است.

پروفیل تغییرات رطوبت-فاصله نمونه‌های فیش فینگر را می‌توان در شکل ۱ مشاهده کرد. رطوبت نمونه‌ها از مرکز به طرف سطح کاهش می‌یابد و با افزایش دما، سرعت خروج آب از نمونه افزایش می‌یابد. چنین روندی در افزایش زمان نیز مشاهده می‌شود. فاصله بین نمودارهای دقیقه اول و سوم، نسبت به فاصله نمودارهای دقیقه سوم و ششم نشان می‌دهد که با افزایش زمان، میزان خروج رطوبت افزایش می‌یابد ولی از ضریب نفوذ آن کاسته می‌شود.

دانکن نمونه‌ها در دقایق اول، سوم و ششم در جدول ۲ نشان داده شده است. آزمایشات مقایسه خروج آب که جهت محاسبه ضریب انتشار بکار رفته است، در دماهای مختلف در شکل ۲ نشان می‌دهد که با گذشت زمان، آب بیشتری از محصول خارج می‌شود ولی شیب همه نمودارها با گذشت زمان کاهش می‌یابد، که این امر بیانگر کاهش سرعت خروج آب با گذشت زمان و در نتیجه کاهش ضریب دیفوزیون رطوبت است. با افزایش دما میزان خروج آب محصول افزایش می‌یابد. به عکس زمان، دما تاثیر مستقیم در ضریب دیفوزیون آب دارد. این امر در محاسبه ضریب دیفوزیون ثابت در بخش بعدی به خوبی مشخص شده است.

Table 1. Analysis of variance relating to the effect of temperature and time on the moisture content of fish finger

Parameters	Sum of Squares	df	Mean Square	F	P	Fcrit
Time	4.7849	2	2.3924	471.8532	0.0000	6.0129
Temperature	0.4808	2	0.2404	47.4134	0.00000006	6.0129
Between Groups	0.0205	4	0.0051	1.0131	0.4267	4.5790
Within Groups	0.0912	18	0.0051			
Total	5.3775	26				

مقایسه میانگین دانکن بین نمونه‌ها در دقایق اول، سوم و ششم در جدول ۴ نشان داده شده است. شکل ۳ تغییرات محتوای روغن نمونه‌های سرخ شده را که از رطوبت آن‌ها جهت محاسبه ضریب انتشار استفاده شده است، در دماهای مختلف نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود با گذشت زمان محتوای روغن نمونه در حال افزایش است، ولی این افزایش در دقایق ابتدایی با سرعت بیشتری صورت می‌گیرد که دلیل آن را می‌توان به کاهش محتوای رطوبت طی زمان آزمایش نسبت داد.

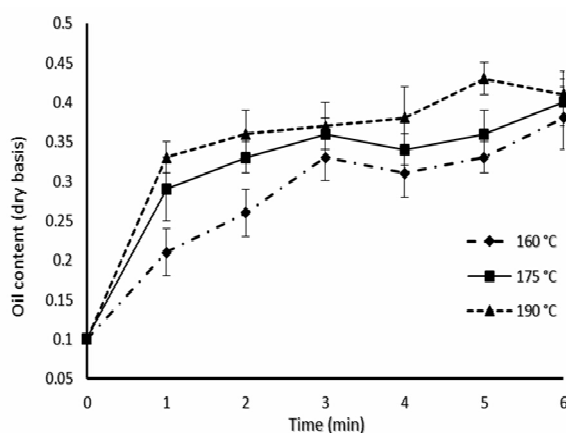


Fig 3. Oil content changes of fried fish finger samples at different temperatures

شدن پوسته، بسته شدن منافذ سطحی، کاهش غلظت آب موجود، همچنین مواجه آب با روغن سطحی در حال ورود به منافذ باقیمانده است.

جهت اطمینان از معنی داری متغیرهای دمای روغن و زمان سرخ کردن بر خروج رطوبت، محتوای رطوبت نمونه‌ها در دقایق اول، سوم و ششم فرایند، در همه دماها در سطح اطمینان ۹۹٪ مورد سنجش قرار گرفت. نتایج تجزیه واریانس مربوط به اثر دما و زمان بر محتوای رطوبت فیش فینگر در جدول ۱ نشان داده شده است. همانطور که در جدول مشاهده می‌شود و مقایسه آماره F با آماره Fcrit نشان می‌دهد؛ اثر دما و زمان بر خروج رطوبت محصول معنی دار است. همچنین نتایج حاصل از مقایسه میانگین

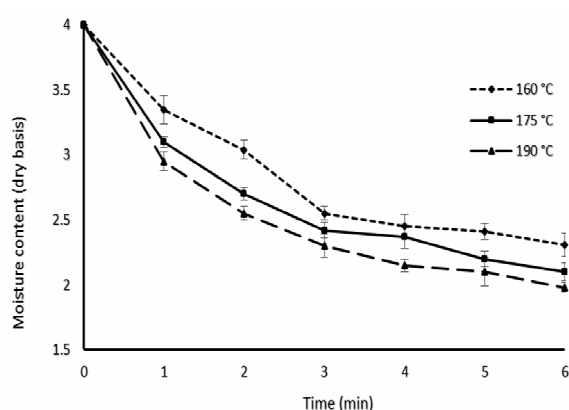


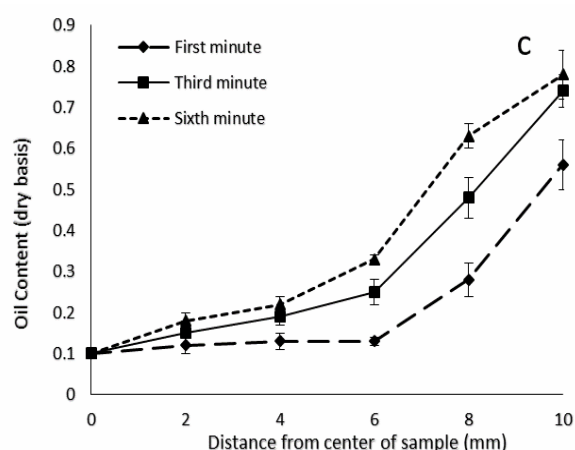
Fig 2 Moisture content changes of fish finger samples at different temperatures

۲-۳- جذب روغن

جهت اطمینان از معنی داری متغیرهای دمای روغن و زمان سرخ کردن بر جذب روغن، محتوای روغن نمونه‌ها در دقایق اول، سوم و ششم فرایند، در همه دماها در سطح اطمینان ۹۹٪ مورد سنجش قرار گرفت. نتایج تجزیه واریانس مربوط به اثر دما و زمان بر محتوای روغن محصول در جدول ۳ نشان داده شده است. همانطور که در جدول مشاهده می‌شود، اثر دما و زمان بر جذب روغن محصول معنی دار است. همچنین نتایج حاصل از

Table 2 Analysis of variance relating to the effect of temperature and time on the oil content of fish finger

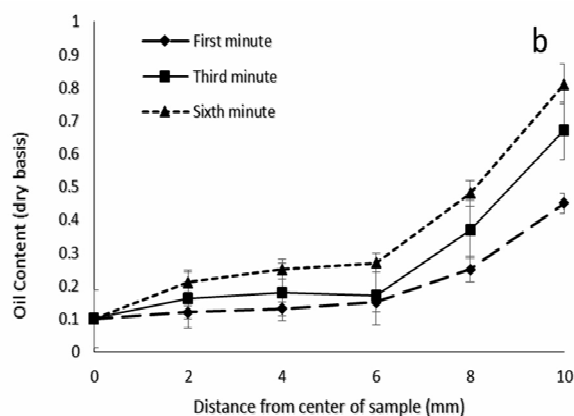
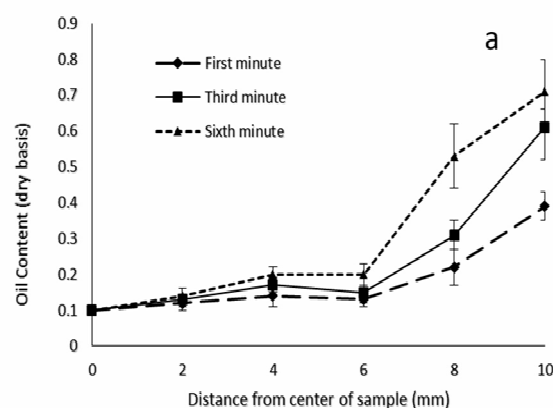
Parameters	Sum of Squares	df	Mean Square	F	P	Fcrit
Time	0.0664	2	0.03323	29.6138	0.000002	6.0129
Temperature	0.0188	2	0.0094	8.4059	0.0026	6.0129
Between Groups	0.0075	4	0.0019	0.6782	0.1987	4.5790
Within Groups	0.0202	18	0.0011			
Total	0.1131	26				

**Fig 4** Oil content changes of fish finger samples at different temperatures. (a) 160 °C (b) 175 °C (c) 190 °C

۳-۳- ضریب انتشار موثر

به منظور تعیین ضریب نفوذ موثر آب طی فرایند سرخ کردن عمیق، با استفاده از داده‌های آزمایشی و رابطه ۲، نسبت بدون بعد رطوبت نمونه‌ها در دماهای مختلف در برابر زمان فرایند رسم شد و از طریق برازش خطی و بدست آوردن شیب نمودار، ضریب انتشار موثر رطوبت محاسبه گردید. نمودار نسبت بدون بعد رطوبت در برابر زمان در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۵ دیده می‌شود، نمودار حالت خطی کامل نداشته و شیب آن در حال تغییر است. این رخداد که در بسیاری از پدیده‌های صنایع غذایی اتفاق می‌افتد، نشان می‌دهد که ضریب انتشار دقیق آب در طول فرایند ثابت نیست و به میزان آب از دست رفته و خصوصیات فیزیکی جسم در هر لحظه بستگی دارد. در چنین مواردی برای پی بردن به گرادیان و ماهیت ماده و مقایسه آن، اقدام به محاسبه ضریب انتشار ثابت از طریق شیب خط برازش شده با نمودار می‌گردد. ولی در مواردی همچون مدل‌سازی و محاسبات ریاضی و طراحی ماشین آلات صنعتی که نیازمند

پروفیل جذب روغن را در نمونه فیش فینگر، می‌توان در شکل ۴ دید. با گذشت زمان، از سرعت جذب روغن کاسته می‌شود. همچنین بیشترین میزان خروج رطوبت از لایه‌های سطحی صورت می‌گیرد. به گونه‌ای که تغییرات روغن مرکز در زمان‌های اولیه قابل اغماض است. این نتیجه با دستاوردهای موریرا و باروفا در سال ۱۹۹۶ مطابقت دارد، به این ترتیب در محصولات ضخیم، مانند فرنچ فرایز و فیش فینگر بیشترین جذب روغن در دو میلی‌متری سطح نمونه رخ می‌دهد [۸].



ضرایب انتشار موثر بدست آمده در این تحقیق در دماهای مختلف در جدول ۱ نشان داده شده است. همانطور که قابل ملاحظه است، با افزایش دما ضریب نفوذ آب افزایش می‌یابد. ضرایب بدست آمده بین $7/4 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ تا $7/6 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ متغیر است. این نتایج مشابه ضریب دیفوزیون $1/31 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ برای سرخ کردن سوسیس در دمای 180°C درجه سلسیوس [۱۸] و ضریب دیفوزیون $3/88 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ برای سرخ کردن پانتوا (یک غذای سنتی هندی) در دمای 125°C تا 145°C درجه سلسیوس [۱۹]، کمتر از ضریب دیفوزیون $8/9 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ برای سرخ کردن چیپس توریتلا در دمای 180°C درجه سلسیوس [۲۰] و بیشتر از ضریب دیفوزیون $3/88 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ برای سرخ کردن گوشت خوک در دمای 90°C تا 110°C درجه سلسیوس است [۲۱].

پیش‌بینی گرادیان دقیق ماده در لحظه می‌باشد، از ضریب انتشار متغیر استفاده می‌گردد و ضریب انتشار متغیر به صورت تابعی از دمای فرایند و غلظت ماده در حال انتشار در لحظه تعریف می‌شود.

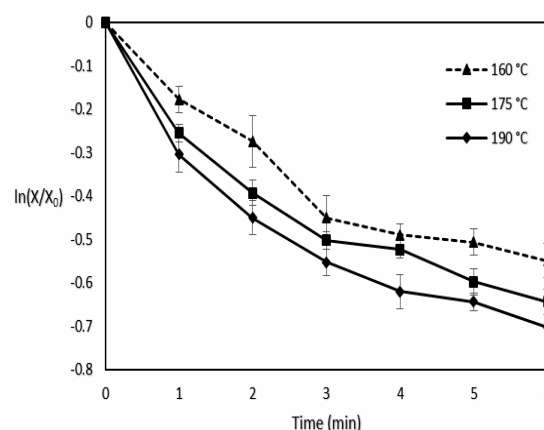


Fig 5 Dimensionless ratio of moisture at different temperatures and times

Table 3 Effective diffusivity at different temperatures of experiment

Temperature ($^\circ\text{C}$)	diffusivity (m^2/s)	Confidence of fit
160	7.4×10^{-7}	0.95
175	7.5×10^{-7}	0.98
190	7.6×10^{-7}	0.98

رخ می‌دهد. بررسی‌ها نشان داد که با افزایش خروج آب، بر جذب روغن افزوده می‌شود. همچنین گرادیان غلظت در طول فرایند ثابت نیست و بیشترین میزان جذب روغن در دقیقه اول فرایند رخ می‌دهد. با افزایش زمان سرخ کردن با بسته شدن منافذ و سخت شدن پوسته از سرعت انتقال جرم کاسته می‌شود.

برای بدست آوردن تاثیر دما بر ضریب دیفوزیون، با رسم $\ln(X/X_0)$ در برابر $1/T$ با استفاده از رابطه آرنیوس انرژی اکتیواسیون برابر با 1288 kJ/kg.mol بدست آمد. همچنین مقدار D_0 در این رابطه برابر با $1/06 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ محاسبه شد.

۴- نتیجه‌گیری

ضریب انتشار (دیفوزیون) موثر آب طی سرخ کردن نمونه‌های فیش‌فینگر در دماهای مختلف اندازه‌گیری شد. ضرایب بدست آمده بین $7/4 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ تا $7/6 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ متغیر بود. با استفاده از رابطه آرنیوس، ارتباط ضرایب و تاثیر دما بر ضریب دیفوزیون موثر آب، همچنین انرژی اکتیواسیون فرایند محاسبه گردید. انرژی اکتیواسیون برابر با 1288 kJ/kg.mol بدست آمد. همچنین مقدار D_0 در این رابطه برابر با $1/06 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ محاسبه شد. پروفیل‌های جذب روغن در دماهای مختلف نشان داد که بیشترین میزان جذب روغن در لایه‌های سطحی محصول

۵- منابع

- [1] Codex Stan 166 – 1989; Standard for quick frozen fish sticks (fish fingers), fish portions and fish fillets - breaded or in batter; Adopted 1989. Revisions 1995, 2004. Amendments 2011, 2014.
- [2] Gazmuri, A.M., Bouchon, P., 2009. Analysis of wheat gluten and starch matrices during deep-fat frying. Food Chemistry 115 (3), 999–1005.
- [3] Farkas, B.E., 1994. Modeling Immersion Frying as a Moving Boundary Problem. Ph.D.

- [14] Adedeji, A. A., Ngadi, M. O., & Raghavan, G. S. V. (2009). Kinetics of mass transfer in microwave precooked and deep-fat fried chicken nuggets. *Journal of Food Engineering*, 91(1), 146-153.
- [15] Math, R. G., Velu, V., Nagender, A., & Rao, D. G. (2004). Effect of frying conditions on moisture, fat, and density of papad. *Journal of Food Engineering*, 64(4), 429-434.
- [16] Zogzas, N.P., Maroulis, Z.B., 1996. Effective moisture diffusivity estimation from drying data: a comparison between various methods of analysis. *dryingTechnology* 14 (7 and 8), 1543-1573.
- [17] Sebti, I., D. Blanc, A. Carnet-Ripoche, R. Saurel and V. Coma. 2004. Experimental study and modeling of nisin diffusion in agarose gels. *J. Food Eng.* 63(2), 185-190.
- [18] Dincer, I., and Yildiz, M. 1996. Modelling of thermal and moisture diffusions in cylindrically shaped sausages during frying. *Journal of Food Engineering*, 28(1), 35-44.
- [19] Neethu, K. C., Franklin, M. E., Pushpadass, H. A., Menon, R. R., Rao, K. J., and Nath, B. S. 2014. Analysis of Transient Heat and Mass Transfer during Deep-Fat Frying of Pantoa. *Journal of Food Processing and Preservation*.
- [20] Moreira, R. G., Palau, J., Castell-Perez, M. E., and Sweat, V. E. 1992. Heat and mass transfer mechanism and oil degradation during deep fat frying of tortilla chips. Paper No. 92-6599. *Proceedings of the American Society of Agricultural Engineers*, St. Joseph, MI, USA.
- [21] Sosa-Morales, M. E., Orzuna-Espíritu, R., and Vélez-Ruiz, J. F. 2006. Mass, thermal and quality aspects of deep-fat frying of pork meat. *Journal of Food Engineering*, 77(3), 731-738.
- Thesis, University of California, Davis, USA.
- [4] Vitrac, O., Dufour, D., Trystram, G. and Raoult-Wack, A. L. 2002. Characterization of heat and mass transfer during deep-fat frying and its effect on cassava chip quality. *Journal of Food Engineering* 53, 161-176.
- [5] Moreira, R.G., Sun, X. and Chen, Y. 1997. Factors affecting oil uptake in tortilla chips in deep-fat frying. *Journal of Food Engineering*, 31, 485-498.
- [6] Vitrac, O., Raoult-Wack, A.L. and Trystram, G. 2003. Influence of liquid water transport on heat and mass transfer during deep-fat frying. In: *Transport Phenomena in Food Processing* (edited by J. Weltri Chanes, J. Ve'les-Riuz and G.V. Barbosa-Ca' novasn). Pp. 445- 461. Boca Raton, USA: CRC Press
- [7] Gamble, M.H. and Rice, P. 1987. Effect of pre-fry drying of oil uptake and distribution in potato crisp manufacture. *International Journal of Food Science and Technology*, 22, 535-548.
- [8] Moreira, R.G. and Barrufet, M.A. 1996. Spatial distribution of oil after deep-fat frying of tortilla chips from a stochastic model. *Journal of Food Engineering*, 27, 279-290.
- [9] AACC, 1986. Moisture content. In: *Approved Methods of the American Association of Chemists*. AACC, St Paul, MN
- [10] AOAC, 1975. *Official methods of analysis of the association of official analytical chemists* (12th ed.). Washington, DC.
- [11] Crank, J., 1975. *The mathematics of diffusion*. 2nd ed., Oxford university press, Oxford.
- [12] Perry, R.H., Chilton, C.H., 1973. *Chemical engineers handbook*. 5th ed., McGrawhill, New York
- [13] Chirife, J., 1980. Fundamentals of the drying mechanism during air dehydration of foods. In *Advances in drying*, Mujumdar, A.S., (Ed). Hemisphere, McGrawhill 2, 73-102.

Investigation of the effect of frying conditions on oil uptake and calculation of effective moisture diffusivity in deep fat frying of fish finger

Izadi, S.H.¹, Emam Djomeh, Z.^{2*}, Moini, S.², Askari, G.³

1. Former Master of Science Student, Department of Food Science and Engineering, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
2. Professor, Department of Food Science and Engineering, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
3. Assistant Professor, Department of Food Science and Engineering, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

. (Received: 2015/04/15 Accepted:2015/05/27)

In this study the effect of deep fat frying conditions such as oil temperature, process time and thickness of product, *i.e.* fish fingers was investigated on moisture loss and oil uptake. Frying experiments were performed at three temperatures of 160, 175 and 190 °C and six time periods of 1 to 6 minutes (with 1 min intervals). In addition flow profile, correlation of oil uptake and moisture loss, and their mechanisms were assayed. Then the effective moisture diffusivities were measured at different temperatures during fish finger frying. Correlation of diffusivities and influence of temperature on effective moisture diffusivity, as well as activation energy of the process, was calculated using Arrhenius equation. Oil uptake profiles at different temperatures showed that the most level of oil uptake occurred on surficial layers. Experiments, therefore, proved that there was a close relationship between oil uptake and moisture loss of fish fingers during deep fat frying, so that oil uptake was augmented with increasing moisture loss. Moreover, increment of temperature had a direct effect on oil uptake due to the augmentation of moisture loss.

Keywords: Oil uptake, Deep-fat frying, Effective diffusivity, Fish finger

* Corresponding Author E-Mail Address: emamj@ut.ac.ir