



بررسی سینتیک رطوبت و پارامترهای انتقال جرم چپیس سیب زمینی طی سرخ کردن با هوای داغ

مهديه حسینی^۱، حبیب اله میرزایی^{۲*}، امان محمد ضیایی فر^۳، حسینعلی تاش شمس آبادی^۴، علی معتمدزادگان^۵

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران.

۲- دانشیار، دانشکده علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران.

۳- دانشیار، دانشکده علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران.

۴- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران.

۵- دانشیار، دانشکده علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، مازندران، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ های مقاله :	در صنایع غذایی، تولید غذاهای آماده سرخ شده، باهدف بهبود شاخص کیفی سلامت مصرف کننده، نیازمند بهینه نمودن فرآیندهای تولید صنعتی است. در این زمینه، سرخ کردن با هوای داغ یک روش جایگزین برای سرخ کردن عمیق، جهت تولید محصولات سیب زمینی مانند چپیس با محتوای چربی کمتر خواهد بود. یکی از مهم ترین نکات در طراحی، مدل سازی و بهینه سازی فرآیندهای سرخ کردن؛ تعیین دقیق پارامترهای انتقال جرم است. بر این اساس، در این پژوهش به بررسی سینتیک خروج رطوبت، محاسبه پارامترهای انتقال جرم از جمله: ضریب نفوذ مؤثر رطوبت، عدد بدون بعد بایوت گرمی، ضریب انتقال جرم سطحی و همچنین انرژی فعال سازی در سه دما (۱۴۰ - ۱۶۰ و ۱۸۰ درجه سانتی گراد) و دو سرعت جریان هوای داغ (۲ و ۴ متر بر ثانیه) در ده نقطه با بازه زمانی ۶۰-۶۰۰ ثانیه پرداخته شد. در این مطالعه، برای نخستین بار از سرعت جریان هوا به عنوان یک متغیر در سرخ کردن با هوای داغ استفاده شد و نتایج حاصل از آن نیز نشان از تأثیرات معنی دار این فاکتور بر روی سینتیک خروج رطوبت داشته است. سایر نتایج نشان داد تمامی پارامترهای انتقال جرم و همچنین ثابت سینتیک کاهش آب، با دما نسبت مستقیم داشته و با افزایش دمای فرآیند، افزایش یافتند. در دو سرعت جریان هوای مورد آزمون نیز همه پارامترها به جز عدد بایوت، روند افزایشی نشان دادند. نتایج انرژی فعال سازی به دست آمده با استفاده از معادله آرنیوس نیز در سرعت جریان هوای ۲ متر بر ثانیه، مقادیر بیشتری برآورد شد.
کلمات کلیدی: انتقال جرم، انرژی فعال سازی، سینتیک رطوبت، فرآیند سرخ کردن هوای داغ.	
DOI: 10.52547/fsct.18.116.357	
* مسئول مکاتبات: mirzaeihabib1@gmail.com	

۱- مقدمه

سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum*) یکی از محصولات سیب‌زمینی حاصل از سیب‌زمینی مانند چیپس سیب‌زمینی و سیب‌زمینی سرخ‌کرده، بیشتر شناخته‌شده و به‌عنوان میان وعده مصرف می‌شوند [۶]. صنعت عملیات سرخ کردن در اواسط قرن نوزدهم آغاز شده و حجم فروش آن در طول سال‌های اخیر به دلیل محبوبیت این محصولات در میان مصرف‌کنندگان در تمام سنین و همچنین آماده‌سازی آسان و سریع آن قبل از مصرف، رشد چشمگیری داشته است. با این حال، مطالعات بسیاری نشان می‌دهد که مصرف بیش‌ازحد محصولات سرخ‌شده می‌تواند به خطرات جدی سلامت مانند ابتلا به بیماری‌های قلبی عروقی، فشارخون بالا، دیابت، سرطان و چاقی منجر شود [۷]. این واقعیت، همراه با روند فعلی جامعه برای مصرف محصولات بدون چربی، اکثر صنایع به‌ویژه صنعت تولید چیپس را مجبور کرده است، تلاش‌هایی برای توسعه روش‌های جایگزین سرخ کردن، جهت دستیابی به محصولات با محتوای کم‌روغن ولیکن با همان ویژگی‌های مطلوب طعم، رنگ و بافت، صورت دهند. در این راستا استراتژی‌های بسیاری برای این مسئله وجود دارد از جمله: سرخ کردن تحت خلأ [۸ و ۹]، پیش تیمارهایی هم چون ماکروویو [۱۰]، آنزیم بری، انجماد [۱۱]، پیش خشک‌کردن [۱۲] و غیره. به‌هرحال با همه این تمهیدات، صنعت سرخ کردن همچنان پرهزینه از نقطه‌نظر مصرف روغن و تهدیدکننده سلامت، باقی‌مانده است. سرخ کردن با هوای داغ یک روش جدید سرخ کردن است که محصولات از طریق تماس مستقیم با هوای داغ و قطرات روغن در محفظه سرخ‌کن قرار می‌گیرند. روغن استفاده‌شده در این فرآیند، به میزان چشمگیری از روغن مصرفی در روش سرخ کردن عمیق کمتر خواهد بود. امروزه، در بازار، تجهیزات خانگی که بر اساس به دست آوردن محصولات سرخ‌شده کم‌چرب، طراحی شده‌اند، موجود است ولیکن در این باره مقالات علمی که مکانیسم‌های انتقال حرارت و سیتیک جرمی را توصیف کند وجود ندارد؛ بنابراین، درک علمی بهتر از این تکنیک به‌منظور ارائه آن به صنایع و رستوران‌ها، نه‌تنها به لحاظ مزایای سلامت مصرف‌کنندگان، بلکه مزایای اقتصادی و صرفه‌جویی در هزینه و حجم روغن مورد استفاده و همچنین عدم ایجاد پساب پس از سرخ کردن، ضروری است. به‌صورت کلی فرآیند سرخ کردن شامل چهار مرحله: ۱- پیش حرارت دهی^۳ یا حرارت دهی اولیه در

سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum*) یکی از محصولات سیب‌زمینی حاصل از سیب‌زمینی مانند چیپس سیب‌زمینی و سیب‌زمینی سرخ‌کرده، بیشتر شناخته‌شده و به‌عنوان میان وعده مصرف می‌شوند [۶]. صنعت عملیات سرخ کردن در اواسط قرن نوزدهم آغاز شده و حجم فروش آن در طول سال‌های اخیر به دلیل محبوبیت این محصولات در میان مصرف‌کنندگان در تمام سنین و همچنین آماده‌سازی آسان و سریع آن قبل از مصرف، رشد چشمگیری داشته است. با این حال، مطالعات بسیاری نشان می‌دهد که مصرف بیش‌ازحد محصولات سرخ‌شده می‌تواند به خطرات جدی سلامت مانند ابتلا به بیماری‌های قلبی عروقی، فشارخون بالا، دیابت، سرطان و چاقی منجر شود [۷]. این واقعیت، همراه با روند فعلی جامعه برای مصرف محصولات بدون چربی، اکثر صنایع به‌ویژه صنعت تولید چیپس را مجبور کرده است، تلاش‌هایی برای توسعه روش‌های جایگزین سرخ کردن، جهت دستیابی به محصولات با محتوای کم‌روغن ولیکن با همان ویژگی‌های مطلوب طعم، رنگ و بافت، صورت دهند. در این راستا استراتژی‌های بسیاری برای این مسئله وجود دارد از جمله: سرخ کردن تحت خلأ [۸ و ۹]، پیش تیمارهایی هم چون ماکروویو [۱۰]، آنزیم بری، انجماد [۱۱]، پیش خشک‌کردن [۱۲] و غیره. به‌هرحال با همه این تمهیدات، صنعت سرخ کردن همچنان پرهزینه از نقطه‌نظر مصرف روغن و تهدیدکننده سلامت، باقی‌مانده است. سرخ کردن با هوای داغ یک روش جدید سرخ کردن است که محصولات از طریق تماس مستقیم با هوای داغ و قطرات روغن در محفظه سرخ‌کن قرار می‌گیرند. روغن استفاده‌شده در این فرآیند، به میزان چشمگیری از روغن مصرفی در روش سرخ کردن عمیق کمتر خواهد بود. امروزه، در بازار، تجهیزات خانگی که بر اساس به دست آوردن محصولات سرخ‌شده کم‌چرب، طراحی شده‌اند، موجود است ولیکن در این باره مقالات علمی که مکانیسم‌های انتقال حرارت و سیتیک جرمی را توصیف کند وجود ندارد؛ بنابراین، درک علمی بهتر از این تکنیک به‌منظور ارائه آن به صنایع و رستوران‌ها، نه‌تنها به لحاظ مزایای سلامت مصرف‌کنندگان، بلکه مزایای اقتصادی و صرفه‌جویی در هزینه و حجم روغن مورد استفاده و همچنین عدم ایجاد پساب پس از سرخ کردن، ضروری است. به‌صورت کلی فرآیند سرخ کردن شامل چهار مرحله: ۱- پیش حرارت دهی^۳ یا حرارت دهی اولیه در

1. French Fries
2. Crisp

3. Preheating

بهینه‌سازی فرآیندهای سرخ کردن؛ تعیین صحیح پارامترهای انتقال جرم است. بر این اساس، هدف از این پژوهش بررسی فرآیند سرخ کردن با هوای داغ و به دنبال آن، آنالیز و تحلیل سینتیک خروج رطوبت و محاسبه پارامترهای انتقال جرم از جمله ضریب نفوذ مؤثر رطوبت (ضریب انتشار رطوبت)، عدد بدون بعد بایوت جرمی و ضریب انتقال جرم سطحی خواهد بود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تهیه نمونه‌ها

سیب‌زمینی وارسته آگريا پاییزه از اتحادیه سیب‌زمینی داران گرگان تحت نظر واحد علوم و تحقیقات گرگان خریداری گردید و در دمای حدود ۸ درجه سانتی‌گراد دور از نور جهت جلوگیری از جوانه‌زنی نگهداری شد. روغن مورد استفاده در این پژوهش نیز، روغن سرخ‌کردنی بدون پالم با برند اوایلا بود.

۲-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها

سیب‌زمینی پس از شست‌وشو، پوست‌گیری شده و به روش دستی و با استفاده از اسلایسر Bentati (ساخت کشور سوئد) ورق‌هایی به ضخامت ۲ میلی‌متر (ضخامت مطلوب کارخانه‌های تولید چیپس) و قطر ۴۰ میلی‌متر آماده نموده و پس از آن برای خروج نشاسته سطحی با آب مقطر شست‌وشو داده شد. آب اضافی سطحی نیز با استفاده از دستمال کاغذی گرفته شد.

۲-۳- عملیات سرخ کردن

فرآیند سرخ کردن در سرخ‌کن هوای داغ خانگی Sergio (مدل SAF162 ساخت ایتالیا) مجهز به سیستم تنظیم دما در محدوده ۲۰۰-۸۰ درجه سانتی‌گراد در دماهای ۱۴۰-۱۶۰ و ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد با دو سرعت جریان هوای ۲ و ۴ متر بر ثانیه در ۱۰ نقطه زمانی ۶۰۰-۶۰ ثانیه انجام شد. میزان روغن مصرفی با توجه به ویژگی دستگاه، ۰/۰۲ گرم روغن به ازای ۱ کیلوگرم سیب‌زمینی (۱: ۰/۰۲ w/w) تعریف شده است؛ بنابراین ورقه‌های سیب‌زمینی با وزن کاملاً یکسان در هر آزمون، آماده و به میزان نسبت تعریف شده، فرآیند آغشته سازی به روغن، به شکل یکسان برای تمامی نمونه‌های مورد آزمون صورت گرفت. پس از اتمام هر فرآیند، چیپس

زمان‌های ابتدایی فرآیند (عدم تبخیر و انتقال حرارت جابجایی طبیعی در سرخ کردن عمیق و انتقال حرارت جابجایی اجباری در سرخ کردن با هوای داغ). ۲- مرحله جوشش سطحی شامل تشکیل پوسته و انتقال حرارت جابجایی اجباری (لازم به ذکر است که این مرحله در سرخ کردن با هوای داغ، با عنوان جوشش سطحی نمی‌تواند مطرح گردد، درواقع می‌توان آن را همان مرحله تشکیل پوسته و انتقال حرارت جابجایی از نوع اجباری دانست). ۳- مرحله نرخ کاهشی^۴ شامل افزایش ضخامت پوسته (طولانی‌ترین مرحله). ۴- مرحله نقطه پایان حباب^۵ [۱۳]. طی فرآیند سرخ کردن، در نتیجه به‌کارگیری دماهای بالا، قسمت اعظم آب ماده غذایی به شکل بخار از آن خارج می‌شود بنابراین، بررسی میزان از دست دادن رطوبت در حین سرخ کردن مواد غذایی حائز اهمیت می‌باشد. برای پیش‌بینی صحیح روند سرخ شدن مواد غذایی باهدف افزایش کیفیت محصول سرخ‌شده، می‌توان تغییرات محتوای رطوبتی طی فرآیند سرخ کردن را مدل‌سازی نمود. مدل‌سازی محتوای رطوبتی، روابط بین متغیرهای گوناگون، ازجمله محتوای رطوبتی و زمان را ارائه می‌دهد و می‌تواند اطلاعاتی در ارتباط با میزان محتوای رطوبتی در زمان‌های مختلف یا آهنگ خروج رطوبت از ماده غذایی طی این فرآیند و همچنین، شناخت پارامترهای مهم و مؤثر در فرآیند، مانند ضریب انتشار مؤثر رطوبت را فراهم کند [۱۴]. بنابراین، برای بررسی بهتر تغییرات کمی و کیفی محصول سرخ‌شده، مدل‌سازی محتوای رطوبتی طی فرآیند سرخ کردن، حائز اهمیت می‌باشد. علاوه براین، مطالعه درباره ضریب انتشار مؤثر رطوبت برای بررسی میزان از دست دادن آب ضروری می‌باشد. ضریب انتشار مؤثر رطوبت، یک خصوصیت انتقال کلی است که همه مکانیسم‌های ممکن حرکت رطوبت در ماده غذایی (مانند انتشار مایع، انتشار بخار و جریان موئینگی) را توصیف می‌کند [۹]. در مطالعات انجام‌شده توسط محققان مختلف، به‌منظور مدل‌سازی محتوای رطوبتی طی فرآیند سرخ کردن، در اغلب روش‌های مورد استفاده، فرض شده است که خروج رطوبت توسط تئوری انتقال جرم و از طریق مکانیزم های انتشار داخلی کنترل می‌شود [۱۵-۱۷]. همچنین، در میان مدل‌های ارائه‌شده، مدل حاصل از قانون دوم انتشار فیک بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از مهم‌ترین نکات در طراحی، مدل‌سازی و

4. Rate falling

5. Bubble end point

هم واحد با متغیر موردبررسی است، E_a انرژی فعال‌سازی (J/mol) ، R ثابت گاز ایده آل و T دما برحسب درجه سانتی‌گراد یا کلون می‌تواند باشد. با رسم $\ln k_m$ در برابر عکس دما و به دست آوردن شیب و عرض از مبدأ، انرژی فعال‌سازی و ثابت A_m محاسبه خواهد شد.

$$K_m = A_m \cdot \exp(-E_a/RT)$$

۶-۲- تخمین پارامترهای انتقال جرم

۶-۲-۱- ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

غلظت، مطابق قانون دوم فیک در شرایط ناپایدار به‌عنوان تابعی از زمان و موقعیت برای یک صفحه، با در نظر گرفتن شرایط مرزی بیان می‌گردد [۲۰]. که در آن C مقدار رطوبت موضعی در مبنای وزن خشک، t زمان و x شاخص فضایی می‌باشد.

$$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = \frac{1}{D_{eff}} \frac{\partial C}{\partial t} \quad 0 \leq x \leq L \quad t > 0$$

$$\left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad -D \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=L} = K_f (C|_{x=L} - C_\infty) \quad C|_{t=0} = C_i$$

برای به کار بردن قانون فیک، چیپس سیب‌زمینی به صورت صفحه یا تیغه در نظر گرفته می‌شود. حل معادله فیک برای یک تیغه، مطابق معادله ۵ می‌باشد [۲۱]:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right)$$

با استفاده از داده‌های مربوط به تغییرات رطوبت - زمان، مطابق معادله ۲ با استفاده از برازش منحنی، شیب خط (ثابت سینتیک کاهش آب) حاصل و با جایگذاری در معادله ۶ ضریب نفوذ مؤثر محاسبه می‌گردد.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left[-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right]$$

۶-۲-۲- عدد بایوت جرمی

حل عدد بایوت جرمی مطابق معادلات ۷ و ۸ صورت گرفت [۲۲]:

$$D_i = v / K_m L$$

$$Bi = 24.85 / D_i^{0.375}$$

D_i : عدد بدون بعد دینسر: v : سرعت جریان هوا (m/s) و K_m : ثابت سینتیک کاهش آب L : نصف ضخامت نمونه و Bi : عدد بدون بعد بایوت جرمی.

۶-۲-۳- ضریب انتقال جرم سطحی

ضریب انتقال جرم با استفاده از معادله ۹ محاسبه گردید:

$$H_m = D_{eff} \times Bi / L$$

سیب‌زمینی سرخ‌شده توزین و برای اندازه‌گیری رطوبت، آون گذاری گردید.



Fig 1 Frying Schematic

۶-۲-۴- محتوای رطوبت

اندازه‌گیری میزان رطوبت نمونه‌های سرخ‌شده، با خشک کردن نمونه‌ها در آون memmert (مدل UF55) با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت در سه تکرار انجام گرفت. نمونه‌ها پس از خروج از آون، در دسیکاتور سرد شدند و میزان رطوبت بر مبنای وزن خشک محاسبه گردید.

۶-۲-۵- سینتیک رطوبت

تغییرات رطوبت محصول طی سرخ کردن از یک تابع‌نمایی کاهشی پیروی می‌کند. مدل سینتیک کاهش رطوبت، طی سرخ کردن، مشابه کروکیدا [۱۸] با معادله (۱) و همچنین بیک و میتال [۱۹] نیز به‌صورت یک تابع‌نمایی با معادله (۲) و یک سری شرایط مرزی در نظر گرفته می‌شود.

$$-d_m/d_t = K_m (m_t - m_\infty)$$

$$\ln (m_t - m_\infty) / (m_0 - m_\infty) = -K_m t$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} m = 0 \quad m|_{t \rightarrow \infty} = 0$$

m_t : رطوبت نمونه‌ها در هر لحظه بر پایه ماده خشک $(d.b)$ ، m_∞ : رطوبت تعادلی نمونه‌ها (رطوبت نمونه‌ها در زمان بی‌نهایت)، m_0 : رطوبت اولیه نمونه‌ها $(d.b)$. مدل سینتیکی فوق روی داده‌های تجربی بررسی شده و با رسم منحنی آن در برابر زمان و به دست آوردن شیب خط حاصل، ثابت سینتیکی K_m برای دماهای مختلف آزمایش برآورد خواهد شد. برای بررسی ارتباط ثابت سینتیک کاهش آب با دمای فرآیند از معادله آرنیوس استفاده می‌شود. A فاکتور تناوب و

h_m : ضریب انتقال جرم سطحی، D_{eff} : ضریب نفوذ مؤثر
 رطوبت، L : نصف ضخامت نمونه، Bi : عدد بدون بعد بایوت
 جرمی.

جهت بررسی ارتباط هر سه پارامتر محاسبه شده انتقال جرم با
 دمای فرآیند از معادله آرنیوس استفاده شد.

$$Bi = Bi_0 \cdot \exp(-E_a / RT)$$

$$D_{diff} = D_0 \cdot \exp(-E_a / RT)$$

$$h_m = h_0 \cdot \exp(-E_a / RT)$$

۷-۲- آنالیز آماری

تجزیه و تحلیل آماری داده‌های حاصل از سه تکرار آزمایش،
 در قالب طرح‌های کاملاً تصادفی و به صورت فاکتوریل انجام
 شد. برای رسم نمودارها از برنامه Excel 2013 و جهت
 تجزیه و تحلیل آماری از نرم‌افزار Design Expert 10
 استفاده گردید.

۳- نتایج و بحث

آنالیز واریانس داده‌های مربوط به میزان رطوبت بر مبنای وزن
 خشک نمونه‌ها، در جدول ۱ نشان می‌دهد که اثر سرعت
 جریان‌های مختلف هوا، دما و زمان سرخ کردن ($P \leq 0.01$) و
 همچنین اثرات متقابل دما و سرعت جریان هوا بر میزان
 رطوبت چپس اثر معنی‌داری دارد ($P \leq 0.05$). با افزایش دمای
 سرخ‌کن محتوای رطوبت در زمان‌های یکسان سرخ کردن در
 هر دو سرعت جریان هوا کاهش می‌یابد؛ زیرا افزایش دما منجر
 به افزایش انرژی جنبشی مولکول‌های آب می‌شود و در نتیجه
 افت رطوبت به شکل بخار آب، سریع‌تر می‌شود و محتوای
 رطوبت فرآورده کاهش می‌یابد [۲۳]. دمای سرخ‌کن
 بر محتوای رطوبت نمونه‌های سیب‌زمینی سرخ شده اثر

چشمگیری داشت به‌طوری‌که با افزایش دمای سرخ کردن
 میزان رطوبت باقی مانده در نمونه‌ها کاهش یافت. بر این مبنای،
 کمترین مقدار رطوبت در زمان‌های یکسان و سرعت
 جریان‌های متفاوت هوا از فرآیند سرخ شدن، در دمای ۱۸۰
 درجه سانتی‌گراد مشاهده شد. برای سیب‌زمینی شیرین
 سرخ شده نیز همین حالت گزارش شده است [۲۴]. به‌طور کلی
 انتقال جرم، بستگی به ساختار یا توزیع منافذ و گسترش
 ریزساختارها دارد. همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود زمان
 سرخ کردن نیز بر کاهش رطوبت ورقه‌های سیب‌زمینی طی
 سرخ کردن در هر دو سرعت جریان، تأثیر چشمگیری داشت.
 ورقه‌های سیب‌زمینی سرخ شده در سرعت جریان کمتر در
 مقایسه با نمونه‌های تحت سرعت جریان بالاتر، میزان رطوبت
 بالاتری دارند و ماده خشک در این تیمارها در مقایسه با
 نمونه‌های سرخ شده در سرعت جریان بالاتر، به‌طور معنی‌داری
 کمتر است. همان‌طور که انتظار می‌رفت افزایش زمان سرخ
 کردن سبب کاهش محتوای رطوبت نمونه‌های سرخ شده
 گردید. روند مشابهی توسط برخی از پژوهشگران، طی فرآیند
 سرخ کردن با هوای داغ گزارش شده است [۲۵ و ۲۶]. با توجه
 به شکل ۲ شیب کاهش رطوبت نمونه‌ها، طی زمان، در سرعت
 جریان بالاتر هوا، یک تابع‌نمایی کاهشی است درحالی‌که در
 سرعت جریان پایین‌تر، این روند کاهشی، شکل خطی به خود
 گرفته است و این نشان می‌دهد که در زمان‌های مختلف
 فرآیند، در سرعت جریان کم‌تر، روند کاهش خروج رطوبت با
 یک شیب تقریباً ثابت در دماهای مختلف، به‌ویژه دماهای
 پایین‌تر، صورت گرفته است؛ دلیل این امر، می‌تواند اغتشاش و
 همرفت کم‌تر هوای اطراف نمونه و اثر هم‌زمان آن با دما بیان
 گردد.

Table 1 ANOVA for selected factorial model Mdb(g)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	128.43	15	8.56	136.32	< 0.0001	significant
A-temperature	8.71	2	4.35	69.31	< 0.0001	
B-Air velocity	5.49	1	5.49	87.36	< 0.0001	
C-time	113.71	10	11.37	181.03	< 0.0001	
AB	0.53	2	0.26	4.21	0.0204	
Residual	3.14	50	0.063			
Cor Total	131.57	65				
Std. Dev.	0.25			R-Squared	0.9761	
Mean	2.41			Adj R-Squared	0.9690	
C.V. %	10.41			Pred R-Squared	0.9584	
PRESS	5.47			Adeq Precision	45.591	
-2 Log Likelihood	-13.69			BIC	53.35	
				AICc	29.42	

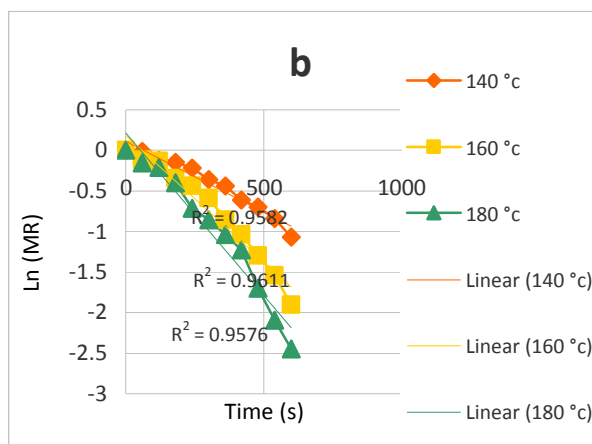
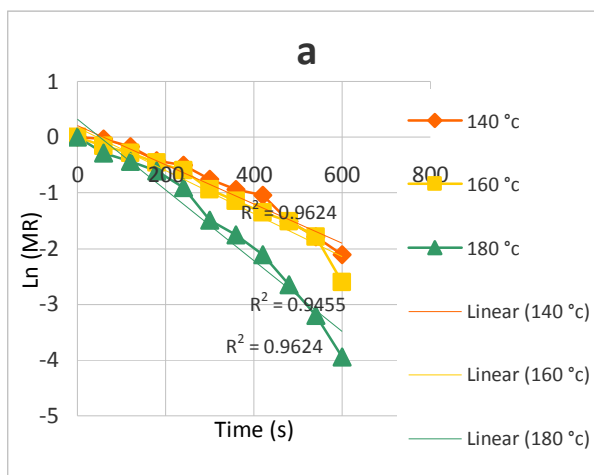


Fig 3 Linear Fit moisture dimensionless (a) air velocity 4 m/s (b) air velocity 2 m/s

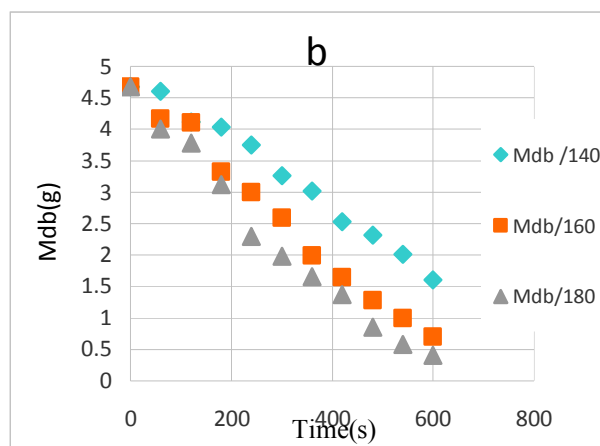
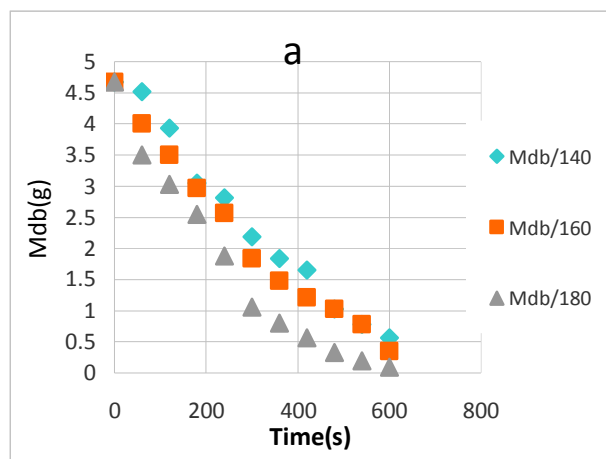


Fig 2 Changes in moisture content during frying (a) Air velocity 4 m/s; (b) Air velocity 2 m/s

۱-۳- پارامترهای انتقال جرم

محاسبات انتقال جرم، بر اساس سرعت کلی اتلاف آب، همچنین سهولت نسبی جابجایی آب از بین یک غذای در حال آبزدایی و از دیواره‌ها و لبه‌های آن است. داده‌های حاصل از محاسبه پارامترهای انتقال جرم در جدول ۳ بیان گردیده است.

۱-۳-۱- ضریب نفوذ مؤثر رطوبت (ضریب انتشار رطوبت)

در اغلب موارد، انتشار، مجموع انتشار فاز بخار و مایع است [۲۷]. در مراحل اولیه فرآیند، زمانی که نمونه دارای مقدار زیادی رطوبت است، مکانیسم فیزیکی که بر رطوبت حاکم است، انتشار مایع است. با پیشرفت فرآیند، سطح نمونه به‌طور مداوم خشک می‌شود [۲۸ و ۲۹]. از این رو، ساختار متخلخل تشکیل شده و درعین حال انتقال رطوبت، ممکن است به شکل بخار باشد. منافذ در ساختار سطح نمونه، به علت افزایش فشار بخار آب داخل آن‌ها، نیز افزایش می‌یابد. این اثر در مرحله نهایی فرآیند رخ می‌دهد.

شکل ۳ خطی سازی مدل انتقال رطوبت به صورت تغییرات لگاریتم طبیعی رطوبت بدون بعد را از ابتدای زمان فرآیند برای هردو سرعت جریان نشان می‌دهد. با محاسبه شیب خطوط برازش شده روی داده‌های لگاریتم طبیعی، مقدار سینتیک کاهش آب (K_m) مطابق جدول ۲ به دست آمد. همان‌طور که مشخص است با افزایش دمای سرخ کردن و همچنین سرعت جریان هوا، ثابت سینتیک کاهش آب افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده سرعت خروج رطوبت بیشتر از محصول در دما و سرعت جریان بالا، نسبت به دما و سرعت جریان کمتر است.

Table 2 Kinetic constant water loss (K_m)

Hot air temperature (°C)	Hot air flow rate (m/s)	(K_m) (1/S)
140	4	0.2114
	2	0.1048
160	4	0.2325
	2	0.1866
180	4	0.3808
	2	0.2402

۳-۱-۳- عدد بایوت جرمی

عدد بایوت (Bi_m) یکی از پارامترهای بدون بعد است که اندازه‌گیری میزان انتشار جرم در مواد جامد را با اندازه‌گیری میزان جابجایی و مقاومت داخلی و سطحی مرتبط می‌سازد [۳۳، ۳۴ و ۳۵] و در فرآیندهایی مانند خشک‌کردن مواد جامد، به این صورت طبقه‌بندی می‌شوند که در مقادیر $Bi \leq 0.1$ مقاومت سطحی قابل‌کنترل است، در $0.1 \leq Bi \leq 100$ هر دو مقاومت قابل‌کنترل هستند و در $Bi \geq 100$ مقاومت داخلی کاملاً کنترل‌شده خواهد بود [۳۳ و ۳۶]. تجزیه و تحلیل آماری مدل خطی مطابق جدول ۶ نشان داد؛ اثر دما بر مقادیر به‌دست‌آمده از عدد بایوت ($0.1 \leq Bi \leq 100$) از نظر آماری معنی‌دار ($P \leq 0.05$) و با افزایش دما، افزایش یافت. آنالیز آماری حاصل از اثر سرعت جریان بر عدد بایوت نیز همانند ضریب انتقال جرم سطحی معنی‌دار نبود با این حال در سرعت جریان بالاتر، در مقایسه با سرعت جریان کمتر، عدد بایوت مقدار کمتری را نشان داد. دلیل این مشاهدات را بایستی این‌گونه بیان کرد که در سرعت جریان پایین، میزان اشباعیت هوای اطراف نمونه بالاتر است و در نتیجه‌ی آن روغن سطح محصول دیرتر به نقطه‌جوش رسیده و در نهایت، تشکیل پوسته در سطح محصول، نسبت به سرعت جریان هوای بالا، دیرتر و در نتیجه، مقاومت سطحی کمتر خواهد بود. به‌طور کلی این نتایج نشان می‌دهد، به سبب واکنش‌هایی که در سطح محصول، به‌ویژه روغن سطحی رخ می‌دهد، مقاومت سطحی متفاوتی در دو سرعت جریان هوا ایجاد می‌گردد که در سرعت جریان هوای بالاتر به سبب تشکیل سریع‌تر پوسته و ایجاد مقاومت سطحی بالا، مقادیر عدد بایوت در دماهای مختلف فرآیند، نسبت به سرعت جریان پایین‌تر، کمتر است. شکل ۶ اثر متقابل دما و سرعت جریان را بر میزان عدد بایوت نشان می‌دهد و همان‌طور که مشاهده می‌گردد شیب کاهشی نمودار در جهت سرعت جریان هوا، عکس شیب نمودارهای ضریب نفوذ و ضریب انتقال جرم است. معادله خطی ۱۵ که در آن T دمای فرآیند و V سرعت جریان هوا را نشان می‌دهند؛ می‌تواند برای پیش‌بینی پاسخ، با توجه به سطوح هرمتغیر، استفاده شود. علامت منفی، نشان‌دهنده نسبت عکس دو متغیر است.

$$Bi_m = +0.71 + 0.094 * T - 0.032 * V$$

دمای بالاتر فرآیند می‌تواند مولکول‌های آب موجود در نمونه را سریع‌تر به بخار تبدیل کند در نتیجه کاهش سریع رطوبت و مقادیر بالاتر ضریب انتشار رطوبت مؤثر را خواهیم داشت [۳۰-۳۲].

تجزیه و تحلیل آماری مدل خطی بر داده‌های ضریب انتشار رطوبت، مطابق جدول ۴ نشان داد که اثر هر دو متغیر دمای هوا و سرعت جریان هوا بر ضریب انتشار رطوبت در سطح احتمال ($P \leq 0.05$) معنی‌دار است و همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد با افزایش دما و سرعت جریان هوا، پارامتر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت، نیز افزایش یافته است. با توجه به نمودار سه‌بعدی ضریب نفوذ در شکل ۴ و اثرات متقابل دما و سرعت جریان هوا، مشاهده می‌شود که کمترین ضریب نفوذ، مربوط به دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد در سرعت جریان هوای ۲ متر بر ثانیه و بالاترین میزان ضریب نفوذ متعلق به دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت جریان هوای ۴ متر بر ثانیه است. معادله خطی ۱۳ که در آن T دمای فرآیند و V سرعت جریان هوا را نشان می‌دهند؛ می‌تواند برای پیش‌بینی پاسخ با توجه به سطوح هرمتغیر استفاده شود.

$$Deff = +9.161E-008 + 3.088E-008 * T + 1.980E-008 * V$$

۳-۱-۲- ضریب انتقال جرم سطحی

تجزیه و تحلیل آماری مدل خطی بر داده‌های ضریب انتقال جرم سطحی مطابق جدول ۳ نشان داد که اثر دمای هوا بر ضریب انتقال جرم بیشتر از اثر سرعت جریان هوا و در سطح احتمال ($P \leq 0.05$) معنی‌دار است در حالی که سرعت جریان‌های مختلف فرآیند، تفاوت معنی‌داری بر ضریب انتقال جرم نداشتند. مقادیر به‌دست‌آمده از ضریب انتقال جرم، نشان می‌دهند که با افزایش دما، ضریب انتقال جرم نیز افزایش یافته است و برای سرعت جریان‌های مورد آزمون، علی‌رغم معنی‌دار نبودن آماری مقایسه آن‌ها، مشاهده گردید که ضریب انتقال جرم در سرعت جریان هوای بالاتر، اندکی بیشتر است. شکل ۵ اثر متقابل دما و سرعت جریان را بر میزان ضریب انتقال جرم نشان می‌دهد و همان‌طور که مشاهده می‌گردد، شیب کاهش نمودار به سمت دما و سرعت جریان کمتر است. معادله خطی ۱۴ که در آن T دمای فرآیند و V سرعت جریان هوا را نشان می‌دهند؛ می‌تواند برای پیش‌بینی پاسخ، با توجه به سطوح هرمتغیر، استفاده شود.

$$h_m = +6.642E-005 + 3.045E-005T + 1.107E-005V$$

Table 3 Mass Transfer Parameters at different Air velocity and frying process temperatures.

Temperature °C	Air velocity (m/s)	diffusion coefficient (D_{eff}) (m^2/s)	Mass transfer coefficient (h_m) (m/s)	Biot number (Bi_m)
140	4	8.56772E-08	5.3007E-05	0.616702
	2	4.24738E-08	2.61937E-05	0.618683
160	4	9.42287E-08	6.04151E-05	0.641154
	2	7.56261E-08	5.79034E-05	0.765653
180	4	1.54332E-07	0.000119062	0.771463
	2	9.73494E-08	8.19385E-05	0.841696

Table 4 ANOVA and R-Squared for D_{eff} Linear model

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	6.167E-015	2	3.083E-015	18.06	0.0212	significant
A-temperature	3.815E-015	1	3.815E-015	22.35	0.0179	
B-Air velocity	2.352E-015	1	2.352E-015	13.78	0.0340	
Residual	5.122E-016	3	1.707E-016			
Cor Total	6.679E-015	5				
Std. Dev.	1.307E-008		R-Squared	0.9233		
Mean	9.161E-008		Adj R-Squared	0.8722		
C.V. %	14.26		Pred R-Squared	0.7211		
PRESS	1.863E-015		Adeq Precision	10.971		

Table 5 ANOVA and R-Squared for h_m Linear model

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	4.445E-009	2	2.222E-009	14.07	0.0299	significant
A-Temperature	3.709E-009	1	3.709E-009	23.48	0.0168	
B-Air velocity	7.359E-010	1	7.359E-010	4.66	0.1198	
Residual	4.740E-010	3	1.580E-010			
Cor Total	4.919E-009	5				
Std. Dev.	1.257E-005		R-Squared	0.9036		
Mean	6.642E-005		Adj R-Squared	0.8394		
C.V. %	18.92		Pred R-Squared	0.6578		
PRESS	1.683E-009		Adeq Precision	9.344		
-2 Log Likelihood	-122.54		BIC	-117.17		
			AICc	-104.54		

Table 6 ANOVA and R-Squared for Biot number (Bi_m) Linear model

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	0.042	2	0.021	15.22	0.0269	significant
A-Temperature	0.036	1	0.036	25.93	0.0146	
B-Air velocity	6.192E-003	1	6.192E-003	4.50	0.1240	
Residual	4.128E-003	3	1.376E-003			
Cor Total	0.046	5				
Std. Dev.	0.037		R-Squared	0.9103		
Mean	0.71		Adj R-Squared	0.8504		
C.V. %	5.23		Pred R-Squared	0.6268		
PRESS	0.017		Adeq Precision	9.651		
-2 Log Likelihood	-26.66		BIC	-21.29		
			AICc	-8.66		

۳-۲- انرژی فعال سازی

انرژی فعال سازی نشان دهنده انرژی مورد نیاز برای حذف رطوبت از یک ماتریس جامد است [۳۷]. وابستگی دمایی ثابت سینتیک کاهش آب، ضریب انتشار رطوبت، ضریب انتقال جرم و عدد بایوت با استفاده از برازش داده ها با معادله ی آرنیوس مطابق شکل ۷ به دست آمد. مقادیر انرژی فعال سازی و فاکتور تناوب در جدول ۷ آورده شده است. همان طور که از نتایج مشخص است میزان انرژی فعال سازی در سرعت جریان هوای پایین تر بیشتر است. دلیل این امر سرعت گردش هوای اطراف محصول در حین سرخ شدن است که هرچه بیشتر باشد خروج رطوبت از محصول با سرعت بیشتر و انرژی کمتری صورت می گیرد. هر چه انرژی فعال سازی کمتر باشد نشان دهنده این است که واکنش با سهولت بیشتری انجام می گردد [۳۸]. انرژی فعال سازی انتقال جرم، بالاتر از انرژی فعال سازی انتشار رطوبت حاصل گردید که حساسیت بیشتر این پارامتر را به دما نسبت به انتشار رطوبت نشان می دهد. با توجه به جدول، مقدار انرژی فعال سازی ضریب نفوذ مؤثر، توسط براوو [۱۴] به روش سرخ کردن عمیق برای چیپس با ضخامت ۲mm در دماهای مشابه این پژوهش، مقدار ۲۵/۴ kJ/mol محاسبه گردیده است که مقدار بیشتری را در مقایسه با نتیجه به دست آمده از انرژی فعال سازی در سرعت جریان بالا و مقدار کمتری در مقایسه با سرعت جریان پایین فرآیند هوای داغ، نشان می دهد. در ادامه توجه به این نکته که با وجود بالاتر بودن میزان ضریب انتقال حرارت در روش سرخ کردن عمیق نسبت به روش هوای داغ، ولی میزان کمتر انرژی فعال سازی در روش هوای داغ با سرعت جریان بالا، می تواند در بهینه سازی فرآیندهای صنعتی، مفید واقع گردد.

Table 7 Parameters estimated for the Arrhenius equations

Air velocity(m/s)	2	4
Ea(k _m)(kJ/mol)	32.42	22.63
Ea(D _{eff})(kJ/mol)	32.42	22.63
Ea(h _m)(kJ/mol)	44.58	31.11
Ea(Bi _m)(kJ/mol)	12.15	8.48
K ₀	138.03	143.92
D ₀	178.72	171.94
h ₀	12.14	2.40
Bi ₀	21.64	7.14
Ea(Deff)(kJ/mol)	25.4 (Bravo et.,2009)	

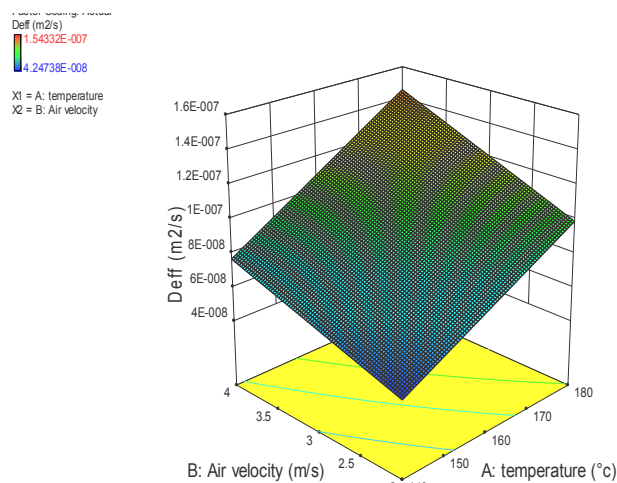


Fig 4 3D diagram interaction of temperature and air flow velocity on the diffusion coefficient

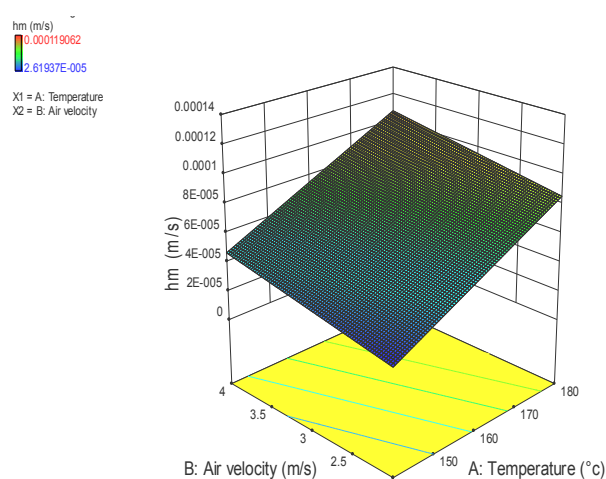


Fig 5 3D diagram interaction of temperature and air flow velocity on the Mass transfer coefficient

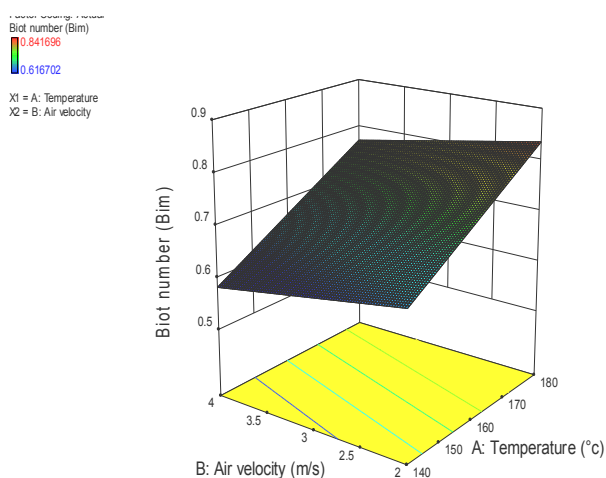


Fig 6 3D diagram interaction of temperature and air flow velocity on Biot number (Bi_m)

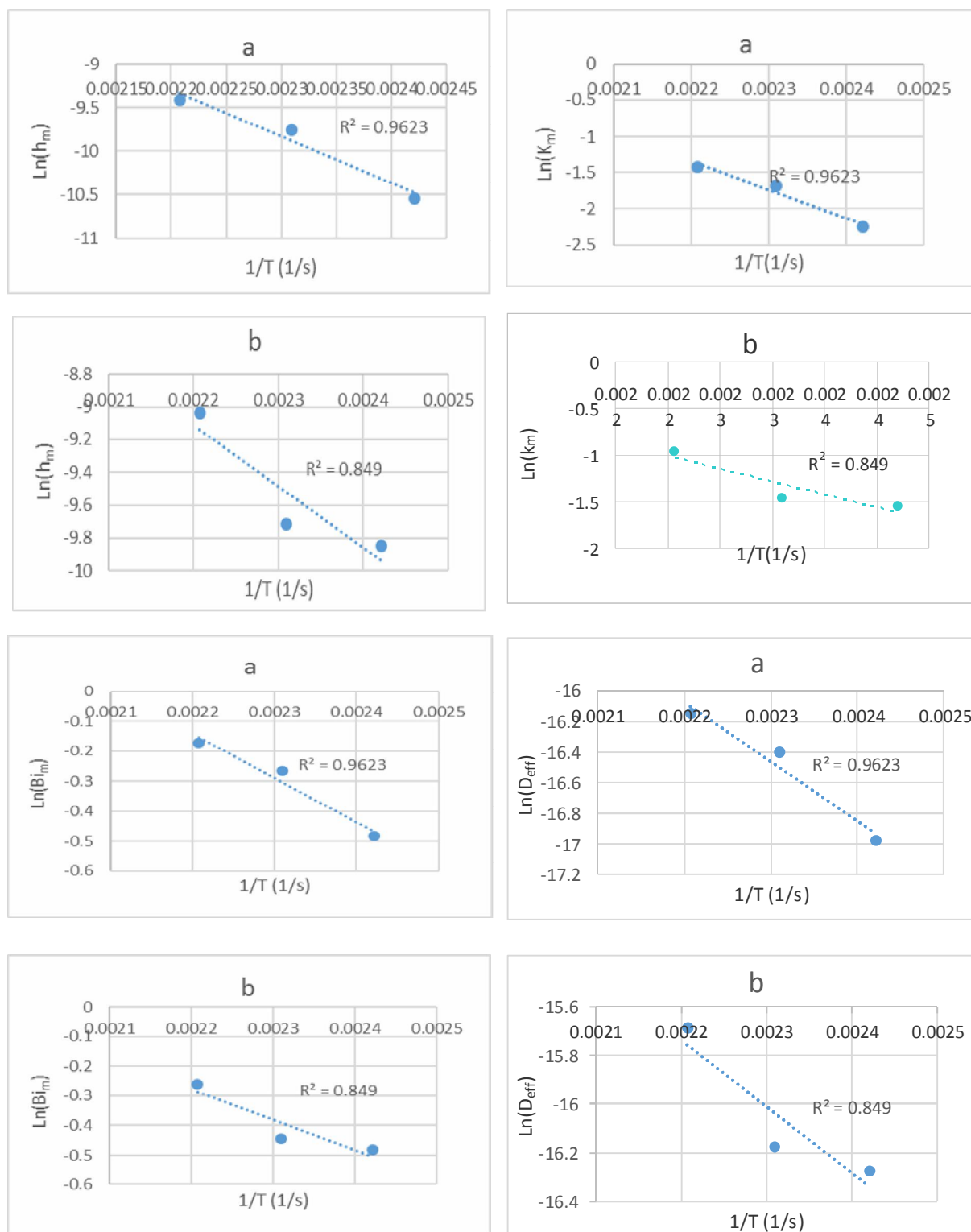


Fig 7 Fitting of the experimental points to the Arrhenius relationship for Kinetic constant water loss, moisture diffusion, mass transfer and Biot number at different Air velocity (a:2,b:4 m/s)

- [3] Lesinska, G., and Leszczynski, W. (1989). Potato science technology. Elsevier Science, NY. USA.
- [4] Hubbard, L. J., and Farkas, B. E. (1999). A method for determining the convective heat transfer coefficient during immersion frying. *Journal of Food Process Engineering*. 22: 201-214.
- [5] Baumann, B., and Escher, E. (1995). Mass and heat transfer during deep fat frying of potato slices. Rate of drying and oil uptake. *Journal of Lebensmittel-Wissenschaft and-Technologie*. 28: 395-403.
- [6] Clark, J. P. (2003). Happy birthday, potato chips! And other snack development. *Food Technology*. 12: 1-9.
- [7] Saguy, S., and Dana, D. (2003). Integrated approach to deep fat frying: engineering, nutrition, health and consumer aspects. *Journal of Food Engineering*. 56, 143-152.
- [8] Dueik, V., Robert, P., and Bouchon, P. (2010). Vacuum frying reduces oil uptake and improves the quality parameters of carrot crisps. *Food Chemistry*. 119(3), 1143-1149.
- [9] Troncoso, E., and Pedreschi, F. (2009). Modeling water loss and oil uptake during vacuum frying of pre-treated potato slices. *LWT Food Science and Technology*. 42(6), 1164-1173.
- [10] Ngadi, M. O., Wang, Y., Adedeji, A. A., and Raghavan, G. S. V. (2009). Effect of microwave pretreatment on mass transfer during deep fat frying of chicken nugget. *LWT- Food Science and Technology*. 35(2), 280-289.
- [11] Moyano, P. C., and Pedreschi, F. (2006). Kinetics of oil uptake during frying of potato slices: effect of pre-treatments. *LWT- Food Science and Technology*. 39, 285-291.
- [12] Debnath, S., Bhat, K. K., and Rastogi, N. K. (2003). Effect of pre-drying on kinetics of moisture loss and oil uptake during deep fat frying of chickpea flour-based snack food. *LWT—Food Science and Technology*. 36, 91-98.
- [13] Alvis, A., Vélez, C., Rada-Mendoza, M., Villamiel, M., and Villada H.S. (2009). Heat transfer coefficient during deep fat frying. *Food Control*. 20, 321-325.
- [14] Bravo, J., Sanjuan, N., Ruales, J., and Mulet, A. (2009). Modeling the dehydration of apple slices by deep fat frying. *Drying Technol*. 27, 782-786.

۴- نتیجه گیری

نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد: Bi_m و h_m ، D_{eff} میزان رطوبت، دمای هوای داغ و سرعت جریان هوا بستگی دارند. با افزایش دما و سرعت جریان هوا، پارامتر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت، افزایش یافته است؛ ضریب انتشار رطوبت برای ورقه‌های سیب‌زمینی در محدوده m^2/s $9/3 \times 10^{-8}$ - $8/56 \times 10^{-8}$ حاصل گردید که کم ترین مقدار آن مربوط به دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد در سرعت جریان هوای ۲ متر بر ثانیه و بالاترین میزان ضریب انتشار، متعلق به دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت جریان هوای ۴ متر بر ثانیه بود. با توجه به نتایج حاصل، اثر دمای هوای داغ بر ضریب انتقال جرم، بیشتر از اثر سرعت جریان هوای داغ نشان داده شد. عدد بایوت نیز در بازه $Bi \leq 100$ با $0/1 \leq$ محدود به بین $0/84 - 0/71$ برآورد گردید که بیانگر کنترل هردو مقاومت سطحی و داخلی می‌باشد. در دمای بالا و سرعت جریان پایین، مقدار عدد بایوت افزایش یافت و دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت جریان ۲ متر بر ثانیه دارای بیشترین مقدار نسبت به سایر تیمارها بود. میزان انرژی فعال‌سازی نیز برای هر سه پارامتر انتقال جرم، در سرعت جریان هوای ۲ متر بر ثانیه، مقادیر بیشتری نشان داد.

۵- علائم و اختصارات

(Bi_m)	عدد بدون بعد بایوت جرمی
(h_m)	ضریب انتقال جرم سطحی
(D_{eff})	ضریب نفوذ مؤثر رطوبت (ضریب انتشار)
(Di)	عدد بدون بعد دینسر
(K_m)	ثابت سینتیک کاهش آب
(v)	سرعت جریان هوای داغ
(E_a)	انرژی فعال‌سازی

۶- منابع

- [1] Gertz, C. (2004). Deep frying remains an art. *European Journal of Lipid Science and Technology*. 106, 713-714.
- [2] Sahin, S., Sastry, S. K. and Bayindirili, L. (1999). Heat transfer during frying of potato slices. *Journal of Lebensmittel-Wissenschaft and-Technologie*. 29: 19- 24.

- [27] Celma, Ar., Ciadris, F., and Lopez Rf. (2011). Convective drying characteristics of sludge from treatment plants in tomato processing industries. *Food Bioprod Process* doi.org/10.1016/j.fbp.2011.04.003.
- [28] Pickles, Ca. (2003). Drying kinetics of nickeliferous limonitic laterite ores. *Miner Eng* 16: 1327–1338.
- [29] Caglar, A., Togrul, T., and Togrul, H. (2009). Moisture and thermal diffusivity of seedless grape under infrared drying. *Food Bioprod Process*. 87: 292–300.
- [30] Rhim, Jw., and Lee, Jh. (2011). Drying kinetics of whole and sliced shiitake mushrooms (*Lentinus edodes*). *Food Sci Biotech*. 20(2): 419–427.
- [31] Singh, Nj., and Pandey, Rk. (2011). Convective air drying characteristics of sweet potato cube (*Ipomoea batatas* L.). *Food Bioprod Process*. 2011.06.006.
- [32] Thuwapanichayanan, R., Prachayawarakorn, S., Kunwisawa, J., and Soponronnarit S. (2011). Determination of effective moisture diffusivity and assessment of quality attributes of banana slices during drying. *LWT - Food Sci Technol*. 44: 1502–1510.
- [33] Jurendic, T. (2012). Determination of the controlling resistance to moisture transfer during drying. *Croat J Food Sci Tech*. 4(1): 34–45.
- [34] Sergio, Ag., Irigoyen, Rmt., Cicuttin, S., and Fiorentini C. (2010). The variable nature of Biot numbers in food drying. *J Food Eng*. 101: 214–222.
- [35] Mrkic, V., Ukrainczyk, M., and Tripalo B. (2007). Applicability of moisture transfer Bi-Di correlation for convective frying of broccoli. *J Food Eng*. 79: 640–646.
- [36] Haghi, Ak., and Amanifard, N. (2008). Analysis of heat and mass transfer during microwave drying of food products. *Braz J Chem Eng*. 25(3): 495–501.
- [37] Aghbashlo, M., Kianmehr, Mh., and Samimi, Ah. (2009). Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin-layer drying of berberis fruit (*Berberidaceae*). *Energ Convers Manage*. 49: 2865–2871.
- [38] Adedeji, A.A., Ngadi, M.O. and Raghavan, G.S.V. (2009). Kinetics of mass transfer in microwave precooked and deep fat fried chicken nugget. *Journal of Food Engineering*. 91: 146-153.
- [15] Moyano, P.C., and Berna, A.Z. (2002). Modeling water loss during frying of potato strips: Effect of solute impregnation. *Drying Technol*. 20, 1303-1318.
- [16] Math, R.G., Velu, V., Nagender, A., and Rao, D.G. (2004). Effect of frying conditions on moisture, fat, and density of papad. *J. Food Eng*. 64, 429-434.
- [17] Pedreschi, F., Hernández, P., Figueroa, C., and Moyano, P. (2005). Modeling water loss during frying of potato slices. *Int. J. Food Prop*. 8, 289-299.
- [18] Krokida, M.K., Oreopoulou, V., Maroulis, Z.B., and Marinos-Kouris, D. (2001). Effects of pre-drying on quality of French fries. *Journal of Food Engineering*. 49, 347-354.
- [19] Baik, O.D., and Mittal, G.S. (2005). Heat and moisture transfer and shrinkage simulation of deep-fat tofu frying. *Food Research International*. 38, 183-191.
- [20] Yildiz, A., Palazoglu, K., and Erdogdu, F. (2007). Determination of heat and mass transfer parameters during frying of potato slices. *Journal of Food Engineering*. 79, 11-17.
- [21] Doymaz, I. (2011). Drying of eggplant slices in thin layers at different air temperatures. *J. Food Process. Preserv*. 35(2), 280-289.
- [22] Dincer, I., and Hussain, M. M. (2002). Development of a new Bi-Di correlation for solids drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 45, 3065–3069.
- [23] Farinu, A. and Baik, O. D. 2005. Deep fat frying of foods: Transport phenomena. *Food Reviews International*. 21: 389-410.
- [24] Abd Rahman, N.A., Abdul Razak, S.Z., Lokmanalhakim, L.A., Taip, F.S. and Mustapa Kamal, S.M. (2017). Response surface optimization for hot air-frying technique and its effects on the quality of sweet potato snack. *Journal of Food Process Engineering*. 40: 12507–12514.
- [25] Ngadi, M., Li, Y., and Oluka, S. (2007). Quality changes in chicken nuggets fried in oils with different degrees of hydrogenation. *LWT – Food Science and Technology*. 40: 1784–91.
- [26] Andrés, A., Arguelles, Á., Castelló, M.L., and Heredia, A. (2013). Mass transfer and volume changes in French fries during air frying. *Food and Bioprocess Technology*. 6: 1917-1924.



The study of moisture kinetics and mass transfer parameters during hot air frying in potato chips

Hosseini, M. ¹, Mirzaei, H. ^{2*}, Ziaifar, A. ³, Tash Shamsabadi, H. ⁴,
Motamedzadegan, A. ⁵

1. Phd student in Food Science and Technology, Faculty of Food Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Golestan, Gorgan, Iran.
2. Associate Professor, Faculty of Food Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Golestan, Gorgan, Iran.
3. Associate Professor, Faculty of Food Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Golestan, Gorgan, Iran.
4. Associate Professor, Department of Mechanical Engineering BioSystem, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Golestan, Gorgan, Iran.
5. Associate Professor, Faculty of Food Science, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Mazandaran, Sari, Iran.

ARTICLE INFO

Article History:

Received 2021/ 04/ 30
Accepted 2019/ 12/ 14

Keywords:

Mass Transfer,
Activation Energy, Moisture
Kinetics,
Hot air Frying Process.

DOI: 10.52547/fsct.18.116.357

*Corresponding Author E-Mail:
mirzaeihabib1@gmail.com

ABSTRACT

In the food industry, fried ready foods are produced to improve the quality of consumer health. It needs to optimize industrial production processes. In this context, hot air frying is an alternative to deep oil frying to Potato products such as chips to obtain with lower fat content. One of the most important points in designing, modeling and optimizing the frying processes is to precisely determine the mass transfer parameters. Accordingly, in this study explores, the effects of mass transfer parameters such as effective penetration coefficient, mass dimensionless Biot number and mass transfer coefficient as well as activation energy in three temperatures (140 - 160 and 180 °C) and two different air flow velocities (2 and 4 m/s) At ten points with a time interval of 60-600 seconds. In this study, for the first time, airflow velocity was used as a variable in hot air frying and its results showed significant effects of this factor on moisture outflow kinetics. Other results showed that all the mass transfer parameters as well as the relative constant of water reduction were directly proportional to the temperature and increased with increasing process temperature. At two air flow velocity tested, all the parameters in except of the Biot number were increasing. The activation energy results obtained by the Arrhenius equation were also estimated at 2 m/s air flow velocity, larger amounts were calculated.