

مدلسازی و تعیین ضریب انتقال جرم شکر در حین آب‌زایش اسمزی از هویج

غلامحسین صدیفیان*، حمیدرضا نیکوآمال راد، احمدرضا کشاورز

کاشان، دانشگاه کاشان، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی شیمی

پیام‌نگار: Sodeifian@kashanu.ac.ir

چکیده

از آنجاییکه فرایند آب‌زایش اسمزی به منظور دستیابی به محصولات با کیفیت بهتر و حفظ خواص اولیه در صنایع غذایی و دارویی از اهمیت قابل ملاحظه‌ای برخوردار است، لذا این مقاله سعی دارد، آب‌زایش اسمزی را در ریشه‌های هویج مورد بررسی تجربی و تحلیلی قرار دهد. چون ساختار بافت و نسوج هویج در دو جهت شعاعی و محوری متفاوت است، از اینرو ضرایب نفوذ شعاعی و محوری با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی تعیین می‌شوند. همچنین مدلسازی ریاضی همراه با قوانین اول و دوم فیک انجام شده است. تأثیر میزان غلظت محلول بر ضرایب نفوذ در دو جهت شعاعی و محوری به کمک اطلاعات تجربی، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: شکر، هویج، آب‌زایش، اسمز، مدل‌سازی ریاضی، ضریب نفوذ محوری و شعاعی

۱- مقدمه

آب‌زایش اسمزی یک تکنیک جدا کردن آب است که در مورد محصولات کشاورزی مانند میوه‌ها و سبزی‌ها برای کاهش محتوای آب آنها اعمال می‌شود [۱]. در طی آب‌زایش اسمزی، محتوای جامد ماده اولیه زیاد می‌شود. فرایند اسمزی، محصولاتی با کیفیت بالا و مقاوم در برابر یخ‌زدگی تولید می‌کند. بنابراین بررسی سازوکار انتقال جرم و تعیین ضریب انتقال جرم، حایز اهمیت است.

انتقال جرم بصورت کمی در حین آب‌زایش اسمزی از قطعات^۱ و لایه‌های^۲ هویج مورد بررسی قرار گرفته است. توزیع آب و شکر در جهت‌های طولی و شعاعی برای یک نمونه از ریشه هویج، تعیین شده

۱. برش در جهت عمود بر محور هویج

۲. پوسته‌های استوانه‌ای موازی محور هویج

است. با استفاده از مدل‌سازی انتقال جرم در جهت‌های طولی و شعاعی و داده‌های آزمایشگاهی ضرایب انتقال جرم در دو جهت محوری و شعاعی تعیین شدند.

انتقال جرم بر اثر وجود اختلاف پتانسیل شیمیایی آب و ماده حل شده در دیواره صورت می‌گیرد. از آنجاییکه بافت هویج بصورت یک سطح نیمه تراوا عمل می‌کند، همواره نفوذ برخی از مواد حل شده به درون مواد غذایی صورت می‌گیرد. انتقال آب عموماً با خروج مقدار زیادی مواد طبیعی (ویتامین‌ها، طعم‌ها، مزه‌ها، اسیدهای میوه، پیگمانها، ساکاریدها و مواد معدنی) همراه است. همچنین نتیجه منطقی این تبادل جرم، محصولی با وزن کمتر و چروکیده می‌باشد.

آب‌زایش اسمزی بعنوان پیش‌فراوری فرایندهای بسیار، از جمله خشک کردن، مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین در انرژی مصرفی

مدل سینتیکی دو پارامتری بر اساس موازنه جرم برای تخمین ضریب انتقال جرم و نقطه تعادل نهایی به کار برده می‌شود [۲۰]. این مدل می‌تواند آب هدر رفته و جامد حاصله را در شرایط تعادل، با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی در طول یک دوره زمانی نسبتاً کوتاه، پیش‌گویی کند [۲۱-۲۳].

قانون فیک برای نفوذ حالت ناپایدار به شکل زیر بیان می‌گردد:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} \quad (1)$$

C : غلظت جزء نفوذکننده

D : ضریب نفوذ

t : مدت نفوذ

X : طول مسیر نفوذ است

روشهای حل معادله فیک در حالت‌های هندسی و شرایط مرزی مختلف ارائه شده‌اند [۲۴].

$$\frac{M}{M_{\infty}} = 1 - \sum_{n=0}^{\infty} f_1 \cdot \exp\left(-f_2 \cdot \frac{D \cdot t}{L^2}\right) \quad (2)$$

M جرم ماده نفوذکننده در غشاء و M_{∞} مقدار پارامتر M در شرایط تعادل است. توابع f_1 و f_2 وابسته به n بوده و نسبت جرم محلول به جامد می‌باشد. L مشخصه هندسی جامد است.

فرضیات به کار رفته در مدل فوق به شرح زیر است:

- نسبت محلول به هویج به اندازه کافی بزرگ است به طوری که غلظت محلول، ثابت فرض می‌شود.
- غلظت جامد حل شده و آب اولیه یکنواخت است.
- ضریب نفوذ ظاهری ثابت است ($D \neq f(C)$).
- فقط جریانهای متقابل نفوذ آب و شکر به طور همزمان مورد بررسی قرار می‌گیرند و از انتقال جرم‌های دیگر صرف‌نظر می‌شود.
- از مقاومت خارجی انتقال جرم صرف‌نظر می‌گردد.
- مقاومت سطحی مورد توجه است و شار جرمی (در این محدوده مورد نظر) با اختلاف غلظت متناسب است.
- مقاومت در سطح وجود نداشته و فیلم محلول شکر در یک لایه مرزی موجود است.

خشک‌کن‌های با هوای داغ صرفه‌جویی می‌شود [۲]. آب زدایش اسمزی بدون تغییر در ساختار مواد، باعث بهبود رنگ، مزه و کیفیت آنها می‌گردد. از آنجاییکه آب‌زدایش اسمزی حتی در دمای محیط قابل انجام است، بنابراین آسیب گرما به بافت، رنگ و طعم مواد غذایی حداقل است. تاثیر پارامترهای اصلی مانند غلظت، ترکیبات محلول اسمزی، دما، مدت غوطه‌وری، آشفتگی محلول، شکل هندسی و نسبت محلول به نمونه، در مورد سازوکار انتقال جرم به طور گسترده مطالعه شده است [۳-۵]. علیرغم مطالعات متعدد، تاکنون قانون کلی اثر متغیرهای آب‌زدایش اسمزی، تعیین نشده است. افزایش غلظت و دمای محلول اسمزی نرخ انتقال جرم را به مقدار معین افزایش می‌دهد. البته اگر افزایش دما از حد معینی تجاوز کند، تغییرات نامطلوبی در طعم، رنگ و بافت محصول مشاهده می‌شود. در سالهای اخیر مطالعات متعددی برای درک بهتر انتقال جرم در حین آب زدایش اسمزی مواد غذایی صورت گرفته است.

۲- مدلسازی ریاضی

دو مقاومت در حین آب‌زدایش اسمزی وجود دارد. این مقاومت‌ها شامل مقاومت داخلی سطوح جامد و مقاومت خارجی محلول می‌باشد. میزان مقاومت داخلی، رابطه‌ی مستقیمی با ساختار بافت جامد دارد. عموماً مقاومت خارجی در مقابل مقاومت داخلی ناچیز است [۶].

برخی از محققین، قانون نفوذ فیک در حالت ناپایدار را برای تخمین نفوذ آب یا ماده حل شده به کار برده‌اند. همچنین آنها شرایط مرزی قانون فیک را در آزمایشگاه، شبیه‌سازی کرده‌اند [۷-۱۱]. این فرضیات شامل غلظت‌های ثابت محلول خارجی و ناچیز بودن مقاومت خارجی در مقایسه با مقاومت داخلی است [۱۲]. در کاربرد صنعتی، بهترین نسبت محلول به ماده‌ی غذایی ۶ به ۴ گزارش شده است [۱۳].

در ویسکوزیته بالا، دمای پایین و غلظت بالای جسم حل شونده، فرض ناچیز بودن مقاومت خارجی صحیح نیست [۱۴]. در این مدل، از ضریب انتقال جرم کلی بجای ضریب نفوذ استفاده می‌گردد. این ضریب نفوذ از شیب غلظت بر حسب ریشه دوم زمان تخمین زده می‌شود. بنابراین، این مدل به اطلاعاتی محدود می‌گردد که برای زمان تماس طولانی صحیح نیست [۱۵-۱۸].

در پدیده انتقال اسمزی، مقدار آب هدر رفته نسبت به جامد حاصله بزرگتر است. بنابراین، این فرایند به عنوان آب زدایش اسمزی در اثر اختلاف پتانسیل شیمیایی شناخته می‌شود [۱۹].

$$S = -D_{r,s} \frac{I_{\infty}^2}{(R - R_b)^2} \quad (6)$$

$D_{r,s}$ ضریب نفوذ شعاعی جامد است. I_{∞} تابع بسمل اصلاح شده مرتبه صفر معمولی است که مقدار آن $2/404$ است. R شعاع نمونه هویج (m) و R_b شعاع لوله پلاستیکی است.

۴- آماده‌سازی مواد خام

هویج‌ها و ساکاروز از یک فروشگاه محلی خریداری می‌شوند. هویج‌ها براساس اندازه و شکل، طبقه‌بندی می‌شوند. سپس نمونه‌ها بصورت استوانه‌هایی به قطر ۴۰ میلی‌متر و طول ۴۰ یا ۷۰ میلی‌متر برش داده می‌شوند. نمونه‌های آماده شده در آب $90^{\circ}C$ و $15^{\circ}B$ به مدت زمان مشخصی جوشانده می‌شوند. نمونه‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند. در مرکز نمونه‌هایی که اندازه‌گیری محوری در آنها مورد نظر است، لوله‌های پلاستیکی به قطر ۴ میلی‌متر جایگذاری می‌شود. هدف از این عمل، محدود کردن نفوذ در جهت شعاع می‌باشد.

۵- طراحی آزمایش

ابتدا محلول ساکاروز با غلظت $30^{\circ}B$ تهیه می‌شود. نمونه‌ها با نسبت جرمی سه به یک در محلول اسمزی در دمای $25^{\circ}C$ جایگذاری می‌شوند. با قرار دادن همزن در ظرف آزمایش حالت تلاطم ایجاد می‌گردد. هدف از این عمل، کاهش مقاومت انتقال جرم داخل محلول است. نمونه‌ها بعد از مدت ۷،۱ و ۱۰ ساعت غوطه‌وری، بیرون آورده می‌شوند. سپس به آهستگی خشک می‌گردند. از دستمال کاغذی برای خشک کردن محلول اسمزی چسبیده به نمونه‌ها استفاده می‌شود. هر نمونه در جهت محوری به دو قسمت مساوی برش داده می‌شود. نیمی از نمونه‌ها (نمونه‌هایی که در مرکز آنها لوله ۴ میلی‌متری قرار گرفته است) برای اندازه‌گیری نفوذ طولی (۷ تکه / هر نمونه) به قطعات ۲ میلی‌متری برش داده شده و نیمی دیگر از نمونه‌ها به صورت لایه‌های استوانه‌ای به ضخامت ۲ میلی‌متر برای اندازه‌گیری نفوذ شعاعی برش داده می‌شوند (۷ لایه / هر نمونه). بخش اول نمونه‌ها برای تعیین غلظت ساکاروز و بخش دوم جهت تعیین محتوای آب مورد استفاده

۳. معیاری از غلظت محلول می‌باشد. به عنوان مثال $15^{\circ}B$ یا 15 درجه بریکس به معنی 15 گرم شکر در 85 گرم آب است. تعیین غلظت محلول‌های قندی برحسب درجه بریکس (B) در صنایع قندوشکر متداول است.

- چروکیدگی در همه جهات بصورت یکنواخت رخ می‌دهد.
- در طول آب زدایی از چروکیدگی صرفنظر می‌شود.
- فرایند، همدمما در نظر گرفته می‌شود.

همچنین مقادیر M در حالات مختلف، متفاوت‌اند. از طرف دیگر محققین ضریب نفوذ را بر اساس بهترین هماهنگی با اطلاعات آزمایشگاهی تعیین نموده‌اند. کانوی^۱ مقدار D برای آب را در حدود $15 \times 10^{-9} \frac{m^2}{s}$ تا $60 \times 10^{-9} \frac{m^2}{s}$ و بریستین^۲ این کمیت را در حدود $0/6 \times 10^{-9} \frac{m^2}{s}$ تا $2/5 \times 10^{-9} \frac{m^2}{s}$ گزارش کرده‌اند [۱۸ و ۲۵]. غلظت‌های متوسط شکر با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$a_w = 1 - K \times M \quad (3)$$

که a_w فعالیت آب است. K برای هر محلول، ثابت است. ($0/196$) برای گلوکوز و $0/248$ برای ساکاروز) و M غلظت شکر در هویج بر حسب مولالیته (مول شکر بر کیلوگرم آب) می‌باشد [۲۶].

۳- تئوری

در حالت نفوذ محوری از معادله قانون دوم فیک در مختصات دکارتی استفاده می‌شود. بنابراین ضریب نفوذ محوری ($D_{l,s}$) به شکل زیر خواهد بود:

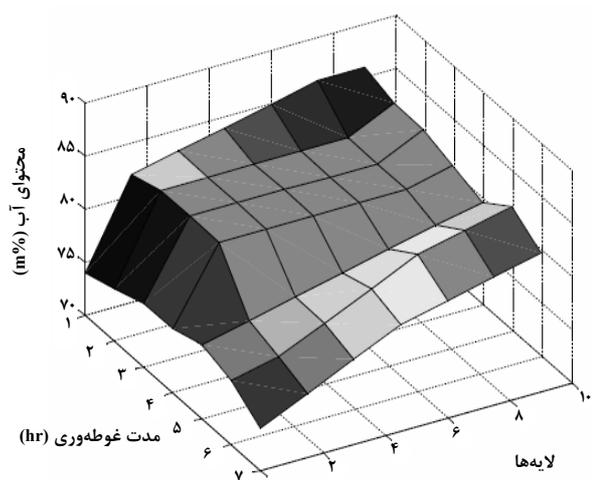
$$S = -D_{l,s} \left(\frac{\pi^2}{4 \times X^2} \right) \quad (4)$$

S شیب معادله (۵) و X پارامتر هندسی (طول نفوذ) می‌باشد.

$$\left[\ln \left(\frac{C_{\infty} - C}{C_{\infty}} \right) = F(t) \right] \quad (5)$$

در حالت نفوذ شعاعی از معادله قانون دوم فیک در یک سیستم مختصات استوانه‌ای استفاده می‌شود. بنابراین رابطه تعیین ضریب نفوذ شعاعی $D_{r,s}$ به شکل زیر خواهد بود:

1. Conway
2. Beristain



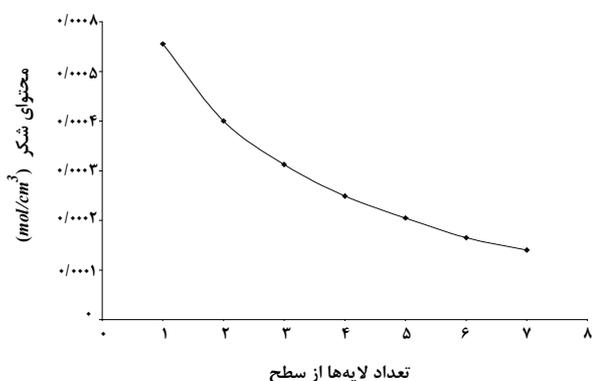
شکل ۲- توزیع محوری آب در قطعات هویج

۲-۷ توزیع شکر

روند تغییرات محتوای ساکاروز در لایه‌ها بر خلاف توزیع محتوای آب در لایه‌ها می‌باشد. این روند در شکل (۳) نشان داده شده است. غلظت شکر در محدوده ۰/۱ تا ۰/۵۸ میلی‌مول بر سانتی‌متر مکعب تغییر می‌کند. انحراف استاندارد شکر ۰/۰۲۵ میلی‌مول بر سانتی‌متر مکعب است. توزیع محوری شکر در شکل (۴) نشان داده شده است. بیشترین محتوای شکر در بیرونی‌ترین لایه مشاهده شده است. اعداد ۱، ۷ و ۱۰ مدت نفوذ را بر حسب ساعت نشان می‌دهند.

۳-۷ توزیع ضریب نفوذ شکر

ضریب نفوذ شکر با استفاده از روش ارائه شده در بخش قبل محاسبه می‌شوند. مقادیر $D_{r,s}$ و $D_{l,s}$ برش به برش و لایه به لایه محاسبه می‌شوند. توزیع ضریب نفوذ شعاعی ($D_{r,s}$) در شکل (۵) و توزیع ضریب نفوذ محوری ($D_{l,s}$) در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۳- توزیع شعاعی شکر در لایه‌های هویج

قرار می‌گیرد. دستگاه رفاکتومتر^۱ برای تعیین غلظت ساکاروز به کار برده می‌شود. جهت تعیین محتوای آب، ابتدا جرم نمونه‌ها اندازه‌گیری و پس از خشک شدن در دمای 70°C مجدداً تعیین جرم می‌شوند. در هر آزمایش، از شربت ساکاروز تازه استفاده می‌شود. تمامی آزمایش‌ها سه مرتبه تکرار شدند. از مقادیر متوسط برای محاسبات، استفاده می‌شود.

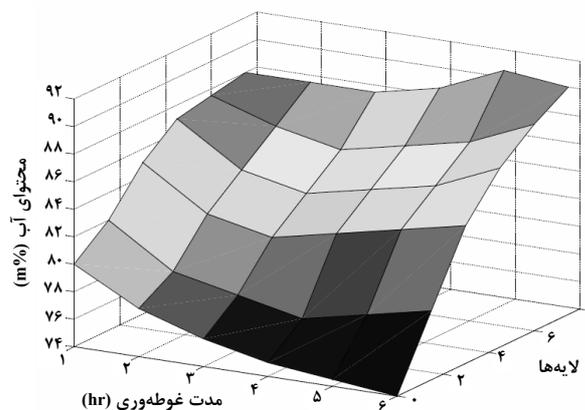
۶- شرح دستگاه

با استفاده از این دستگاه ضریب شکست محلول اندازه‌گیری می‌شود. روش کار بدین صورت است که ابتدا ضریب شکست محلول‌های استاندارد اندازه‌گیری می‌شوند. سپس با مقایسه ضرایب شکست نمونه‌ها با داده‌های استاندارد، غلظت نمونه‌ها تعیین می‌شود. مدل دستگاه رفاکتومتر NAR-IT و ساخت کشور آلمان می‌باشد.

۷- بررسی نتایج

۱-۷ توزیع آب

ظرفیت متوسط آب نمونه‌های هویج ۷۸٪ تا ۹۲٪ با نسبت انحراف معیار استاندارد ۱/۹۸٪ می‌باشد. توزیع محتوای آب در جهت شعاعی بصورت لایه لایه در شکل (۱) دیده می‌شود. لایه‌های بیرونی دارای محتوای آب کمتری نسبت به لایه‌های درونی می‌باشند. کمترین مقدار آب در بیرونی‌ترین لایه و بیشترین آن در مرکز هویج مشاهده می‌شود. غلظت آب در لایه‌ها مطابق شکل (۱) کاهش پیدا می‌کند. توزیع مشابه در جهت طولی در شکل (۲) مشاهده می‌شود.



شکل ۱- توزیع شعاعی آب در لایه‌های هویج

1. Refractometer

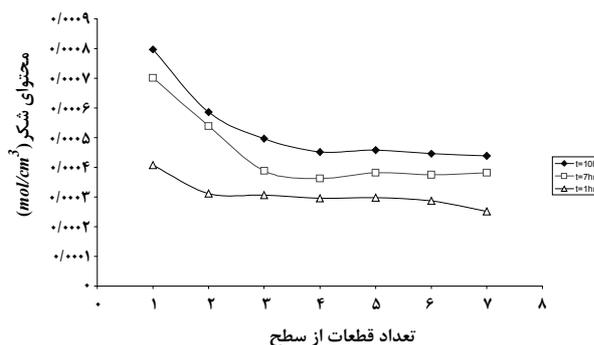
۸- نتیجه گیری

قانون نفوذ ناپایدار فیک بهترین معادله برای توجیه شرایط آزمایش انتقال جرم شکر و آب در لایه‌های هویج در جهت‌های محوری و شعاعی می‌باشد. مقادیر $D_{r,s}$ در سطح هویج و در لایه‌های بیرونی بزرگتر است که بیانگر تفاوت در ساختار بافت ریشه، و یا اختلاف نفوذپذیری لایه‌ها می‌باشد. مقادیر $D_{l,s}$ طبق ساختار همگن نسوج در قطعات ۳ و ۴ و ۵ نمونه‌ها اختلاف ندارند. مقادیر متوسط این ضریب برای نمونه‌های هویج بین $\frac{m^2}{s} \times 10^{-10} \times 0.5$ تا $\frac{m^2}{s} \times 10^{-10} \times 3$ می‌باشند که با نتایج به دست آمده از دیگر پژوهشگران، تطابق دارند و نتایج آنها را مورد تایید قرار می‌دهند.

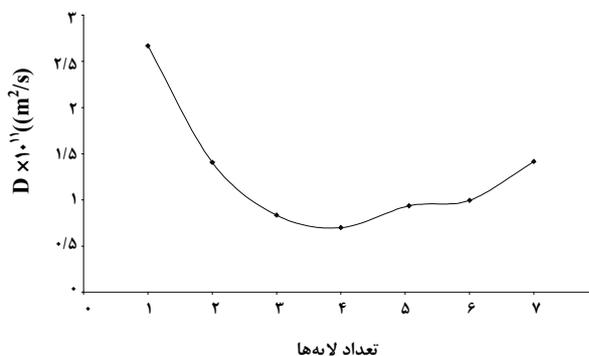
با توجه به اهمیت فرایند آب زدایش اسمزی در خشک کردن مواد غذایی و غنی سازی آنها، به نظر می‌رسد که تحقیقات بیشتری در زمینه فوق ضروری است. بررسی اثر دما و مواد مختلف و ارائه مدل‌های مناسب می‌تواند در پیش‌بینی رفتار فرایند آب زدایش اسمزی و توسعه آن موثر باشد.

مراجع

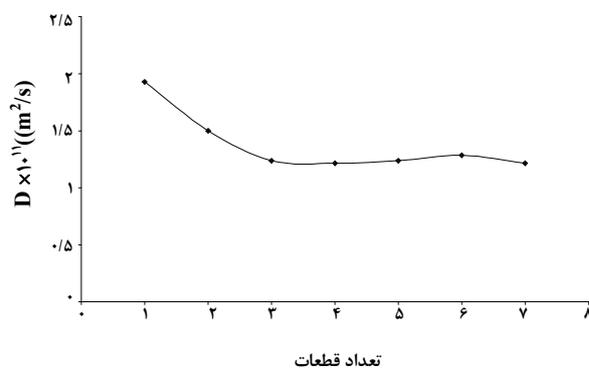
- [1] Kaymak-Ertekin, F., Sultanoglu, M., "Modeling Of Mass Transfer During Osmotic Dehydration of Apples, Journal of Food Engineering", 46, pp. 243-250, (2000).
- [2] Rastogi, N. K., Raghavarao, K. S. M. S., "Water and Solute Diffusion Coefficients of Carrot as a Function of Temperature and Concentration during Osmotic Dehydration", Journal of Food Engineering, 34, pp. 429-440, (1997).
- [3] Toledo, R. T. Fundamental of Food Engineering (2nd ed., pp. 471-472). New Delhi: CBS Publishers and Distributors, (2000).
- [4] Ozen, B. F., Doc10, L. L., Ozdemir, M., & Floros, J. D. "Processing Factors Affecting The Osmotic Dehydration of Diced Green Peppers". International Journal of Food Science and Technology, 37, 497-502, (2002).
- [5] Rastogi, N. 10., & Niranjana, 10." Enhanced Mass Transfer During Osmotic Dehydration of High Pressure Treated Pineapple". Journal of Food Science, 63, 508-511, (1998).
- [6] Spiazzi, E. A., Mascheroni, R. H., "Mass Transfer Model for Osmotic Dehydration of Fruits and Vegetables I. Development of the Simulation Model, Journal of Food Engineering", 34, pp. 387-410, (1997).
- [7] Bird R.B, Stewart W.E., Lightfoot E.N., Transport phenomena, The Second ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, (2001).



شکل ۴- توزیع محوری شکر در قطعات هویج در زمان‌های مختلف



شکل ۵- توزیع شعاعی ضریب موثر انتقال جرم



شکل ۶- توزیع محوری ضریب موثر انتقال جرم

- [8] Conway, J. M., Castaigne, F., Picard, G., Voxan, X., "Mass Transfer Considerations in the Osmotic Dehydration of Apples", *Canadian Institute of Food Science and Technology*, 16, pp. 25–29, (1983).
- [9] Hough, G., Chirife, J., Marini, C. A., "A Simple Model for Osmotic Dehydration of Apples", *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie*, 26, pp. 151–156, (1993).
- [10] Rastogi, N. K., Raghavarao, K. S. M. S., "Effect of Temperature and concentration on Osmotic Dehydration of Coconut", *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie*, 27, pp. 564–567, (1994).
- [11] Kaymak-Ertekin, F., Cakaloz, T., "Osmotic Dehydration of Peas: I. Influence of Process Variables on Mass Transfer", *Journal of Food Processing and Preservation*, 20, pp. 87–104, (1996).
- [12] Lazarides, H. N., Nikolaidis, A., Katsanidis, E., "Sorption Changes Induced by Osmotic Pre-Concentration of Apple Slices in Different Osmotic Media", *Journal of Food Science*, 60, pp. 348–350, (1995).
- [13] Lenart, A., Flink, J. M., "Osmotic Concentration of Potato: I. Criteria for End Point of the Osmotic Process", *Journal of Food Technology*, 19, pp. 45–63, (1984).
- [14] Mavroudis, N. E., Gekas, V., Sjöholm, I., "Osmotic Dehydration of Apples – Effects of Agitation and Raw Material Characteristics", *Journal of Food Engineering*, 35, pp. 191–209, (1998).
- [15] Hawkes, J., Flink, J. M., "Osmotic Concentration of Fruit Slices Prior To Freeze Dehydration", *Journal Of Food Processing And Preservation*, 2, Pp. 265–284, (1978).
- [16] Magee, T. R. A., Hassaballah, A. A., Murphy, W. R., "Internal Mass Transfer during Osmotic Dehydration of Apple Slices in Sugar Solutions", *International Journal of Food Science and Technology*, 1, pp. 177–178, (1983).
- [17] Biswal, R. N., Bozorgmehr, K., Tompkins, F. D., Liu, X., "Osmotic Concentration of Green Peas prior to Freezing", *Journal of Food Science*, 56, pp. 1008–1012, (1983).
- [18] Parjoko, M. A., Rahman, M. S., Buckle, K. A., Perera, C. O., "Osmotic Dehydration Kinetics of Pineapple Wedges Using Palm Sugar", *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie*, 29, pp. 452–459, (1996).
- [19] Raoult-Wack, A. L., Guilbert, S., "La déshydratation osmotique ou procédé de déshydratation-imprégnation par immersion dans des solutions concentrées", *Les cahiers de l'ENS, BANA 'L'eau dans des procédés de transformation et de conservation des aliments'*, 7, pp. 171–192, (1990).
- [20] Azuara, E., Cortes, R., Garcia, H. S. Beristain, C. I., "Kinetic Model for Osmotic Dehydration and its Relationship with Fick's Second Law", *International Journal of Food Science and Technology*, 27, pp. 239–242, (1992).
- [21] Toupin, C. J., Lemaguer, M., "Osmotically Induced Mass Transfer in Plant Storage Tissues". A Mathematical Model – Part 2, *Journal of Food Engineering*, 10, pp. 97–121, (1989a).
- [22] Toupin, C. J., Marcotte, M., Lemaguer, M., "Osmotically Induced Mass Transfer in Plant Storage Tissues. A Mathematical Model" –Part 1, *Journal of Food Engineering*, 10, pp. 13–38, (1989b).
- [23] Marcotte, M., Toupin, C. J., Le Maguer, M., "Mass Transfer in Cellular Tissues. Part I: The Mathematical Model", *Journal of Food Engineering*, 13, pp. 199–220, (1991).
- [24] Crank, J., "The Mathematics of Diffusion", Clarendon Press, Oxford, UK, 2nd Edn., (1979).
- [25] Beristain, C. I., Azuara, E., Cortes, R., Garcia, H. S., "Mass Transfer During Osmotic Dehydration of Pineapple Rings", *International Journal of Food Science and Technology*, 25, pp. 576–582, (1990).
- [26] Favetto, G. J., Chirife, J., "Simplified Method for the Prediction of Water Activity in Binary Aqueous Solutions", *Journal of Food Technology*, 20, pp. 631–636, (1985).