



Mathematical Modelling of Mass Transfer During Osmotic Dehydration of Green Peas in a Fluidized Bed Process

F. Rahimpour¹, B. Abbasi Souraki^{2*}

1- Ph.D. Student of of Chemical Engineering, University of Guilan

2- Associate Professor of Chemical Engineering, University of Guilan

Email: b.abbasi@guilan.ac.ir

Abstract

In this study the osmotic dehydration of green pea in batch and fluidized bed processes was investigated. Mass transfer operation was carried out at the three concentrations 10, 20 and 25 % w/w of water-salt solution and three temperatures 30, 40 and 50°C. In the batch process, the Azuara two-parameter model was applied to determine the values of WL_{∞} and SG_{∞} , and the values of D_{ew} and D_{es} were estimated using the analytical solution of Fick's second law. Mass transfer process was mathematically modelled in the fluidized bed process. The results of both methods indicated that due to the increase in temperature, concentration of osmotic solution and time, the values of WL and SG increased. The predictions of the mathematical model were in good agreement with the experimental data. Mean relative error (MRE) values between the predictions and experimental data, at 50°C and concentrations of 10, 20, and 25 (%w/w) were 1.5, 1.2, and 1.2% for SG , and 1.6, 1.0, and 1.2% for WL , respectively. The values of WL and SG in the batch method and fluidized bed process reached equilibrium after 180 minutes and 60 minutes, respectively, which reveals the advantage of using the fluidized bed process.

Received: 30 December 2024

Accepted: 11 March 2025

Page Number: 123-137

Keywords:

Osmotic Dehydration,
Fluidized Bed,
Mass Transfer,
Green Pea

Please Cite this Article Using:

Rahimpour, F., & Abbasi Souraki, B. (2026). Mathematical Modelling of Mass Transfer During Osmotic Dehydration of Green Peas in a Fluidized Bed Process. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 24(142), 123-137, [In Persian].



مدل‌سازی ریاضی انتقال جرم در آزدایی اسمزی نخودفرنگی در یک فرایند بستر سیال

فرناز رحیم‌پور^۱، بهروز عباسی سورکی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، دانشگاه گیلان

۲- دانشیار مهندسی شیمی، دانشگاه گیلان

پیام‌نگار: b.abbasi@guilan.ac.ir

چکیده

در این مقاله، فرایند آزدایی اسمزی نخودسبز با دو روش ناپیوسته و بستر سیال بررسی شد. عملیات انتقال جرم در سه غلظت ۱۰، ۲۰ و ۲۵ درصد ($\%w/w$) از محلول آب نمک و سه دمای ۳۰، ۴۰ و ۵۰ °C انجام شد. در روش ناپیوسته از مدل دوپارامتری آزورا برای محاسبه مقادیر تعادلی آب جداشده، WL_{∞} و نمک جذب‌شده، SG_{∞} استفاده شد و همچنین، مقادیر ضرایب نفوذ آب و نمک با استفاده از حل تحلیلی قانون دوم فیک حساب شد. در ادامه، فرایند انتقال جرم در بستر سیال، مدل‌سازی ریاضی شد. نتایج هر دو روش نشان داد که در اثر افزایش دما، غلظت محلول اسمزی و زمان، مقادیر SG و WL افزایش یافت. همچنین، محاسبه این مقادیر با مدل ریاضی، هماهنگی خوبی با داده‌های آزمایشگاهی حاصل از بستر سیال نشان داد. مقدار خطای نسبی متوسط MRE در دمای ۵۰ درجه سلسیوس و غلظت‌های ۱۰، ۲۰ و ۲۵ ($\%w/w$) به ترتیب برابر ۱/۵، ۱/۲ و ۲/۱ درصد برای SG و ۱/۶، ۱/۱۰ و ۱/۲ درصد برای WL است. مقادیر SG و WL در روش ناپیوسته و بستر سیال به ترتیب بعد از مدت زمان ۱۸۰ دقیقه و ۶۰ دقیقه به تعادل رسید که نشان‌دهنده برتری استفاده از فرایند بستر سیال است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۱

شماره صفحات: ۱۲۳ تا ۱۳۷

کلیدواژه‌ها:

آزدایی اسمزی،

نخودسبز،

انتقال جرم،

بستر سیالی

* رشت، دانشگاه گیلان، دانشکده فنی

استناد به مقاله:

رحیم‌پور، فرناز، و عباسی سورکی، بهروز. (۱۴۰۴). مدل‌سازی ریاضی انتقال جرم در آزدایی اسمزی نخودفرنگی در یک فرایند بستر سیال، نشریه مهندسی شیمی ایران، ۲۴(۱۴۲)، ۱۳۷-۱۲۳.

امروزه تمایل مصرف‌کنندگان مواد غذایی به غذاهای تازه با ارزش تغذیه‌ای بالا افزایش یافته و از طرفی کاهش زمان فرایند و مصرف انرژی کمتر، در صنعت مهم شده است. از این رو، در سال‌های اخیر فرایند اسمز جلب توجه کرده است. خاصیت اسمز حرکت مولکولی ترکیبات اصلی در یک محلول، از غشای نیمه‌تراوا به محلول دیگری است که حاوی این مولکول‌های ویژه با غلظت کمتر است. در فرایند خشک کردن به روش اسمزی، قطعات ماده غذایی در یک محلول هایپر تونیک قرار داده می‌شود. در این فرایند، آب ماده غذایی به علت اختلاف فشار اسمزی، از آن خارج می‌شود و نیز مقداری از ماده جامد حل‌شدنی به داخل ماده غذایی نفوذ می‌کند. در این فرایند، نیروی محرکه انتقال جرم، اختلاف پتانسیل شیمیایی در دو طرف غشای نیمه‌تراوا، در بین ماده و محلول اسمزی است.

تحقیقات زیادی در مورد نحوه آگیری اسمزی و تأثیر عوامل مختلف بر نحوه انجام آن وجود دارد که نتیجه آن‌ها تأثیر مثبت این پیش فرایند بر حفظ بافت، رنگ و خصوصیات کیفی مواد خشک‌شده به صورت اسمزی بوده است. محققان بسیاری از قانون نفوذ فیک برای توصیف فرایند نفوذ رطوبت در محصولات غذایی استفاده کرده‌اند [۱]. بنابراین، اغلب مدل‌های پیشنهادی بر اساس حل معادله قانون دوم فیک در نفوذ ارائه شده‌اند. از میان این تحقیقات، می‌توان به مدل دو پارامتری آزورا^۱ و همکاران [۲] و هم‌چنین، بررسی‌های انجام‌شده بر روی آزدایی اسمزی کدو حلواپی سبز به دست چانگ^۲ و همکاران [۳]، آزدایی هویج به دست ادین^۳ و همکاران [۴]، آزدایی اسمزی میوه سیب به دست منظور^۴ و همکاران [۵] و امسر^۵ و همکاران [۶]، آزدایی اسمزی پیاز به دست گرزلاک^۶ و همکاران [۷]، پیش‌تیمار آزدایی اسمزی بادمجان به دست جوکار و همکاران [۸]، آزدایی اسمزی کدوسبز به دست رحمان و همکاران [۹]، آزدایی اسمزی پوست لیمو به دست پراجاپاتی^۷ و همکاران [۱۰]، آزدایی اسمزی کدوتلخ به دست جین^۸ و همکاران [۱۱] و آزدایی اسمزی لوبیاسبز به دست عباسی و همکاران [۱۲] اشاره کرد. در تمامی

تحقیقات مذکور، فرایند آزدایی اسمزی به وسیله محلول ساکارز یا نمک و یا مخلوط ساکارز و نمک انجام گرفته و بررسی‌های مختلف بر روی اثر دما، غلظت و نسبت ماده غذایی به محلول اسمزی بر روی میزان حذف آب و جذب جامد و هم‌چنین، ضریب نفوذ آب و ماده حل‌شونده انجام شده است. عباسی و همکاران، خشک کردن نخودسبز را با هوا در یک خشک‌کن با بستر سیال از نظر ترمودینامیکی بررسی کردند و نتایج آن‌ها نشان داد که تغییرات سرعت، تأثیر اندکی بر فرایند خشک کردن دارد و افزایش مقدار اولیه نمونه، مدت خشک کردن را طولانی‌تر می‌کند [۱۳].

با بررسی مطالعات پیشین که در بالا به آن‌ها اشاره شد، تاکنون تحقیقات زیادی بر روی انواع روش‌های خشک کردن اسمزی (به کاربرد میدان الکتریکی پالسی، امواج فراصوت، استفاده از شرایط خلأ و نیروی سانتریفوژی و غیره) در ماده‌های مختلف انجام شده است. اکثر قریب به اتفاق تحقیقات در زمینه آزدایی اسمزی در فرایند ناپیوسته انجام گرفته است و استفاده از فرایند بستر سیال به عنوان یک روش دیگر، تاکنون بررسی نشده است. بدین منظور، در این پژوهش به بررسی این نوع فرایند در آزدایی اسمزی ماده نخودسبز پرداخته شده است.

۲. تئوری

۲-۱ توزیع غلظت‌های تعادلی آب و نمک در حین آزدایی اسمزی

آزورا و همکاران (۱۹۹۲) یک مدل دو پارامتری بر پایه موازنه جرم مواد، برای مدل‌سازی فرایند آزدایی اسمزی و تخمین مقدار تعادلی آب از دست‌رفته (WL_{∞}) و جامد جذب‌شده (SG_{∞}) از ماده پیشنهاد کردند [۲]. در بسیاری موارد، فرایند نفوذ در مواد غذایی ممکن است ساعت‌ها به طول انجامد تا به حالت تعادلی خود برسد و حتی در برخی موارد ممکن است که هرگز به دلیل ناپایداری‌های فیزیکی و زیستی به شرایط تعادل خود نرسد. به دست‌آوردن مقادیر WL_{∞} و SG_{∞} در فرایند اسمز مستلزم ادامه فرایند تا زمان‌های نسبتاً طولانی است. با استفاده از مدل آزورا می‌توان با داده‌های به دست‌آمده در بازه کوچکی از زمان آزدایی، سینتیک فرایند و هم‌چنین، نقطه تعادل را پیش‌بینی کرد. با توجه به این مدل برای آب از دست‌رفته و جامد جذب‌شده به ترتیب معادلات زیر به دست می‌آید:

1. Azuara
2. Chang
3. Uddin
4. Manzoor
5. Emser
6. Grzelak
7. Prajapati
8. Jin

$\mu_4 = 11.7915, \mu_3 = 8.6537, \mu_2 = 5.5201, \mu_1 = 2.4048$
 و غیره. لازم به ذکر است که برای 5 (n)، مقدار $\mu_{n+1} - \mu_n$ به عدد π نزدیک می شود. باتوجه به مقادیر μ_n ، سری فوق به سرعت به سوی همگرایی میل می کند. به عبارت دیگر، تابع نمایی $\exp(-\mu_n^2 \frac{D_e t}{R^2})$ با سرعت زیادی رو به کاهش بوده و به همین دلیل، برای مقادیر کوچک عدد فوریه $FO = \frac{D_e t}{R^2}$ در نظر گرفتن یک جمله از سری فوق کافی است. در نتیجه، با در نظر گرفتن جمله اول سری ها، معادلات زیر به دست خواهد آمد:

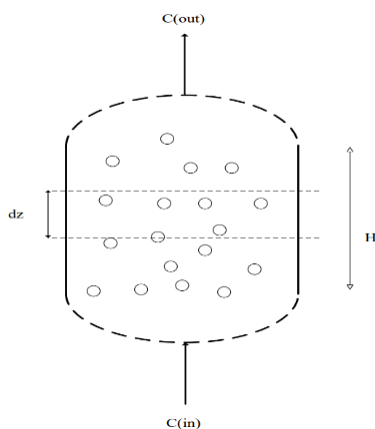
$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{WL_\infty - WL_t}{WL_\infty}\right) = \frac{4}{\mu_1^2} - \left(\frac{\mu_1^2 D_{ew}}{R^2}\right)t \quad (8)$$

$$\ln(SR) = \ln\left(\frac{SG_\infty - SG_t}{SG_\infty}\right) = \frac{4}{\mu_1^2} - \left(\frac{\mu_1^2 D_{es}}{R^2}\right)t \quad (9)$$

در نتیجه، مقادیر D_{es} و D_{ew} به ترتیب از شیب خطوط $\ln(MR)$ و $\ln(SR)$ بر حسب زمان t حساب می شود.

۲-۳ انتقال جرم در فاز سیال

در فرایند آبدیاسی اسمزی در یک بستر سیال، تغییرات غلظت سیال تابعی از زمان و ارتفاع بستر است، در حالی که غلظت ماده غذایی تابعی از زمان و هم چنین، تابعی از مختصات هندسی خود ماده غذایی است. شکل (۱)، نمایی از یک بستر سیال را نشان می دهد که مواد غذایی در داخل آن در حالت سیالی است.



شکل ۱. نمایی از یک بستر سیال.

Figure 1. View of a Fluidized Bed.

$$WL_t = \frac{S_1 t (WL_\infty)}{(1 + S_1 t)} \quad (1)$$

$$SG_t = \frac{S_2 t (SG_\infty)}{(1 + S_2 t)} \quad (2)$$

که در روابط بالا WL_t و SG_t به ترتیب کسر آب ازدست رفته و کسر جامد جذب شده با ماده در زمان t است. هم چنین، S_1 و S_2 ثابت های مدل مربوط به آب ازدست رفته و جامد جذب شده است. معادله (۱) و (۲) را می توان به صورت خطی زیر نوشت:

$$\frac{t}{WL_t} = \frac{1}{S_1 WL_\infty} + \frac{t}{WL_\infty} \quad (3)$$

$$\frac{t}{SG_t} = \frac{1}{S_2 SG_\infty} + \frac{t}{SG_\infty} \quad (4)$$

مقادیر WL_∞ و ثابت مدل S_1 از شیب و عرض از مبدأ خط حاصله از رسم داده های تجربی t/WL_t بر حسب t و با استفاده از آب ازدست رفته از ماده غذایی در زمان های مختلف، به دست می آید. هم چنین، به روش مشابه مقادیر SG_∞ و ثابت مدل S_2 از شیب و عرض از مبدأ خط حاصله از رسم داده های تجربی t/SG_t بر حسب t و با استفاده از جامد جذب شده با ماده غذایی در زمان های مختلف، به دست می آید.

۲-۲ ضرایب نفوذ مؤثر آب و نمک در نخود سبز

میزان آب ازدست رفته و نمک جذب شده با نمونه نخود سبز به شکل کره، در هر زمان با قانون دوم فیک به صورت زیر حساب می شود:

$$\frac{WL_\infty - WL_t}{WL_\infty} = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \exp\left(-\mu_n^2 \frac{D_{ew} t}{R^2}\right) \quad (5)$$

$$\frac{SG_\infty - SG_t}{SG_\infty} = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \exp\left(-\mu_n^2 \frac{D_{es} t}{R^2}\right) \quad (6)$$

که در روابط بالا D_{ew} و D_{es} به ترتیب ضرایب نفوذ مؤثر آب و نمک است:

$$B_n = \frac{4}{\mu_n^2} \quad (7)$$

که مقادیر μ_n در رابطه بالا برابر است با:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = D_e \left(\frac{\partial^2 q}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial q}{\partial r} \right) \quad (13)$$

$$t = 0 \rightarrow q(t, r) = 0 \quad (14)$$

$$r = 0 \rightarrow \frac{\partial q}{\partial r} = 0 \quad (15)$$

$$r = R \rightarrow q(t, r) = q_e \quad (16)$$

در معادله (۱۴)، غلظت جامد در نمونه در لحظه ابتدایی برابر با صفر است؛ اما اگر غلظت براساس آب نوشته‌شود، این مقدار صفر نخواهد بود و باید با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی محاسبه و جای‌گذاری شود (چون در ابتدا نمونه حاوی آب است). هم‌چنین، q_e غلظت تعادلی در نمونه است که با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی در حالت ناپیوسته به دست می‌آید.

۳. مواد مورد استفاده و روش انجام کار

۳-۱ مواد مورد استفاده

ماده آزمایش در این پژوهش، نخودسبز است. برای جلوگیری از پراکندگی داده‌ها و یکسان بودن میزان رسیدگی نخودسبز، این میوه از یک فروشگاه مشخص در بازار، خریداری و فروشگاه مذکور به‌عنوان تنها محل خرید مجدد نمونه‌ها در نظر گرفته شد. در انتخاب نمونه‌ها دقت بسیار شد تا قطر و تازگی و اندازه ظاهری آن‌ها یکسان باشد. نمونه‌ها پس از خریداری، داخل کیسه نایلونی گذاشته و به مدت ۲۴ ساعت در یخچال و در دمای ۴ درجه سلسیوس قرار داده شد تا رطوبت درونی آن یکنواخت شود. قبل از شروع آزمایش‌ها، نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در دمای اتاق قرار داده شد تا با هوای محیط به تعادل برسد. نمونه‌ها با استفاده از یک کولیس با دقت ± 0.02 میلی‌متر اندازه‌گیری شد. با توجه به ساختار کره‌ای نمونه‌ها و احتمال بروز خطا در اندازه‌گیری شعاع آن‌ها، شعاع ده نمونه با کولیس اندازه‌گیری و میانگین آن‌ها به‌عنوان شعاع نمونه‌ها، گزارش شد.

از محلول کلرور سدیم به‌عنوان محلول اسمزی استفاده شد. محلول کلرور سدیم از حل کردن کلرید سدیم خالص، در درون آب مقطر تهیه شد. محلول‌های کلرور سدیم در سه غلظت ۱۰، ۲۰ و ۲۵ درصد وزنی تهیه شد.

با در نظر گرفتن یک جزء حجمی (dz) در ارتفاع بستر و با توجه به این که مقدار ماده حل شده (نمک) در سیال در حین عبور از بستر، جذب نمونه‌های ماده غذایی در المان خواهد شد، می‌توان معادله موازنه جرم را برای المان به صورت زیر نوشت:

میزان ماده حل‌شونده‌ای که از سیال کم می‌شود = میزان ماده

حل‌شونده‌ای که جذب نمونه ماده غذایی می‌شود.

بیان ریاضی معادله بالا برابر است با:

$$A_p \times Rate \times \frac{N \times dz}{H} = -\dot{m}_f \times dC \quad (10)$$

که در معادله (۱۰)، Rate همان نرخ جذب نمک به وسیله مواد که در معادله (۱۰)، A_p و m_p سطح خارجی و جرم یک ذره، N تعداد کل ذرات در بستر، H ارتفاع بستر و C و q به ترتیب غلظت ماده حل‌شونده در سیال و ماده غذایی (نخودسبز) و هم‌چنین، \dot{m}_f دبی جرمی سیال است.

اگر معادله بالا براساس آب از دست‌رفته در نمونه ماده غذایی نوشته‌شود، علامت منفی در سمت چپ قرار می‌گیرد (زیرا آبی که از ماده غذایی خارج می‌شود، وارد سیال می‌شود و علامت سمت راست مثبت خواهد شد).

شرایط مرزی و اولیه برای فاز سیال برابر است با:

$$z = 0 \rightarrow c(t, z) = C_0 \quad (11)$$

$$t = 0 \rightarrow c(t, z) = C_0 \quad (12)$$

که C_0 غلظت اولیه سیال است.

۲-۴ انتقال جرم در فاز جامد

یک کره همگن به شعاع r را در نظر گرفته و فرض می‌شود که نفوذ نمک و رطوبت در این کره فقط در جهت شعاع رخ می‌دهد. با فرض ثابت بودن خواص فیزیکی کره در حین آزدایی، تغییرات غلظت نمک و آب در کره با قانون دوم فیک در مختصات کروی و شرایط مرزی و اولیه مربوطه زیر تخمین زده می‌شود:

۲-۲ روش آزمایش

نمونه‌ها به‌ترتیبی که در قسمت قبل توضیح داده‌شد، تهیه و ابعاد آن‌ها مشخص‌شد. نمونه‌های آماده‌شده با ترازوی سه رقم اعشار وزن‌شد و وزن آن‌ها به‌عنوان وزن نمونه قبل از اسمز یا وزن اولیه (W_0) یادداشت‌شد. سپس، تعدادی ظرف آزمایشگاهی کاملاً شسته، درون آن گذاشته‌شد تا خشک‌شود و سپس، درون دسیکاتور قرار داده‌شد تا بدون جذب رطوبت، به دمای محیط برسد. ظروف مورد نظر وزن‌شد و وزن هرکدام یادداشت‌شده‌است (W_p). برای مشخص کردن رطوبت اولیه موجود در نمونه‌های نخودسبز، تعدادی از آن‌ها با وزن اولیه W_0 در درون ظرف‌های با وزن مشخص قرارگرفت و به‌مدت ۲۴ ساعت درون اجاق الکتریکی با دمای 95°C تا 105°C قرار داده تا کاملاً خشک‌شد. سپس، وزن آن‌ها اندازه‌گیری‌شد که نشان‌دهنده وزن خشک اولیه به‌همراه ظرف (S_0+W_p) است.

در این مرحله، باتوجه‌به این‌که آزمایش‌ها در کدامیک از دو حالت آزمایش درحالت ناپیوسته و فرایند بستر سیال انجام‌خواهدشد، محلول اسمزی با غلظت مشخص درون بشرها یا مخزن بستر سیال ریخته‌خواهدشد. در ادامه، هر حالت به تفصیل توضیح داده‌شده‌است:

○ درحالت آزمایش به‌روش ناپیوسته از دستگاه شیکر انکوباتور مدل آیکا^۱ استفاده‌شده‌است که مجهز به تنظیم‌کننده دما و دور شیکر است. بشرهای حاوی نمونه‌ها درون دستگاه گذاشته‌شد و برای جلوگیری از تبخیر و ایجاد خطا به‌وسیله ورقه پلاستیکی (سلفون) پوشانده‌شد.

به‌منظور انجام آزمایش‌های بستر سیال، مجموعه آزمایشگاهی که در شکل (۳) نشان داده‌شده‌است، طراحی و ساخته‌شده‌است. این مجموعه، شامل: یک استوانه شیشه‌ای از جنس پیرکس با نگهدارنده‌های (فلنج) استیل برای ایجاد بستر سیال، سامانه‌ای برای انتقال سیال شامل مخازن ذخیره محلول اسمزی، پمپ‌ها، لوله‌ها، شیرها و اتصالات و همچنین، سامانه نرم‌افزاری برای کنترل مجموعه آزمایشگاهی است. جریان سیال ورودی به بستر با کنترل دور پمپ و شیرهای تعبیه‌شده در ورودی بستر، تنظیم‌می‌شود. محلول اسمزی با غلظت مشخص از قسمت پایین بستر وارد می‌شود و به‌منظور توزیع یکنواخت سیال در سطح مقطع بستر و همچنین، جلوگیری از

ورود نخودسبز به‌درون لوله‌های ورودی به بستر، از یک صفحه مشبک با آرایش پینچ دایره‌ای استفاده‌شده‌است. همچنین، در خروجی از بستر، از یک توری برای جلوگیری از خروج نخود سبز از بستر و ورود آن به لوله‌های خروجی، استفاده‌شده‌است.



شکل ۲. تصویری از دستگاه شیکر انکوباتور استفاده‌شده در روش ناپیوسته.

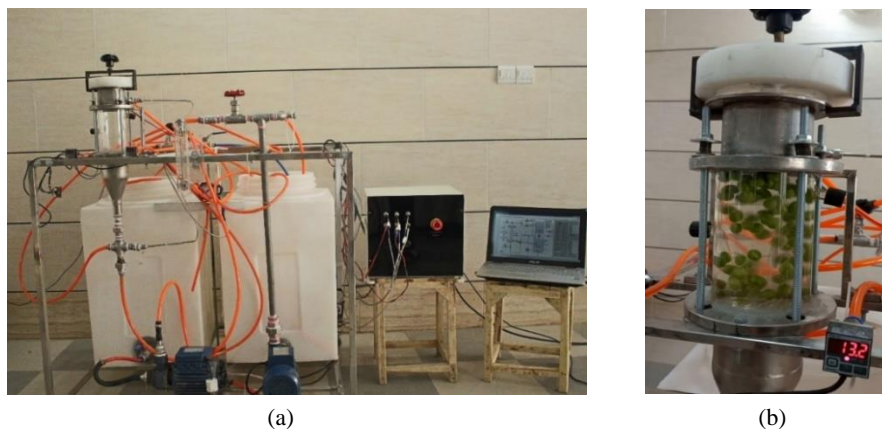
Figure 2. Picture of shaker incubator setup used in batch method.

پس از گذشت زمان‌های متوالی، نمونه‌ها از درون بشرها و یا بستر خارج‌شده‌اند. در پایان هر بازه زمانی، بلافاصله بعد از بیرون‌آوردن نمونه‌ها، با آب مقطر شسته‌می‌شود تا نمک موجود بر روی سطح آن‌ها پاک‌شود. سپس، رطوبت سطحی آن‌ها به‌وسیله یک پارچه پاک‌شد. وزن نمونه‌های مورد نظر اندازه‌گیری‌شد و به‌عنوان وزن نمونه در زمان t بعد از اسمز (W_t) یادداشت‌شده‌است. نمونه‌ها درون ظرف با وزن مشخص قرار داده‌شد و در داخل آن در دمای 95 تا 105 درجه سلسیوس به‌مدت ۲۴ ساعت قرارگرفت تا کاملاً خشک‌شود. ظرف حاوی نمونه با ترازو وزن‌شد و وزن آن به‌عنوان وزن خشک نمونه بعد از اسمز به‌همراه وزن ظرف (S_t+W_p) یادداشت‌شد. آزمایش‌ها در سه ترکیب از سه غلظت ۱۰، ۲۰ و ۲۵ درصد وزنی و سه دمای ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه سلسیوس انجام‌شد. دماهای بالاتر به‌دلیل ایجاد مشکلاتی بر روی شکل و ساختار نمونه (قهوه‌ای شدن، چروکیدگی و غیره) انتخاب‌نشده. هر آزمایش سه بار تکرار شد و متوسط نتایج به‌عنوان داده تجربی گزارش‌شده‌است.

خروج آب از داخل ماده غذایی^۲ (WL) و نفوذ ماده جامد به‌داخل

1. IKA ks 4000 ic Control

2. Water Loss



شکل ۳. (a) مجموعه آزمایشگاهی بستر سیال، (b) قرارگیری نمونه‌ها در بستر سیال.

Figure 3. (a) Fluidized bed setup, (b) Placement of samples in fluidized bed.

حساب شد. مقادیر WL_{∞} و SG_{∞} به ترتیب با رسم t/WL_t و t/SG_t بر حسب t و محاسبه شیب این خطوط به دست آمد. پارامترهای مدل (S_1 و S_2) نیز با استفاده از عرض از مبدا این خطوط حساب شد. شکل‌های (۴) و (۵) خطوط t/WL_t و t/SG_t بر حسب t در دمای ۵۰ درجه سلسیوس و در سه غلظت ۱۰، ۲۰ و ۲۵ درصد وزنی محلول آب نمک را نشان می‌دهند. هم‌چنین، شکل‌های (۶) و (۷)، تغییرات WL_t و SG_t را با زمان در دمای ۵۰ درجه سلسیوس و سه غلظت ذکر شده نشان می‌دهند. مقایسه مقادیر تجربی و مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از مدل آزورا در این شکل‌ها، نشان‌دهنده تطابق خوب داده‌های تجربی با مدل آزورا است. شکل‌های (۶) و (۷) بیانگر آن است که با افزایش غلظت نمک در محلول، مقادیر WL و SG افزایش می‌یابد.

ماده غذایی^۱ (SG) دو عامل مهمی است که در بررسی فرایند آبدایی اسمزی استفاده می‌شود که باتوجه به معادلات زیر بررسی شدند:

$$\%WL = WL_t = \frac{(W_0 - W_t) + (S_t - S_0)}{W_0} \times 100 \quad (17)$$

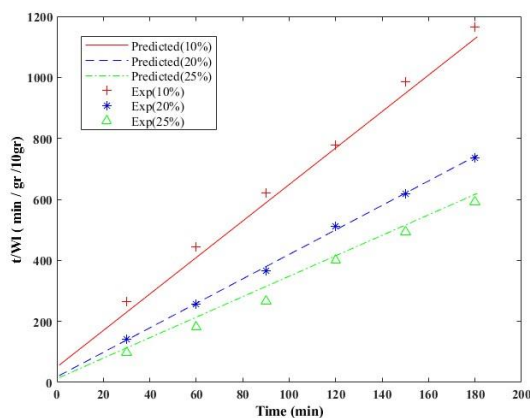
$$\%SG = SG_t = \frac{(S_t - S_0)}{W_0} \times 100 \quad (18)$$

۴. نتایج و بحث

۱-۴ محاسبه غلظت‌های تعادلی آب و نمک نمونه در روش

ناپیوسته

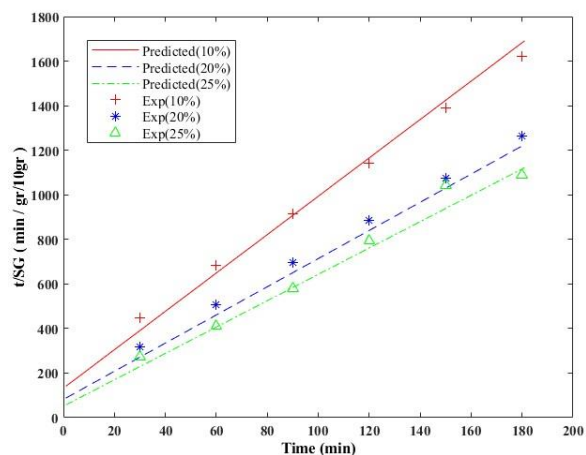
مقادیر WL_{∞} و SG_{∞} با استفاده از فرم خطی مدل دوپارامتری آزورا



شکل ۴. نمودار t/WL بر حسب زمان در دمای ۵۰ °C و غلظت‌های مختلف در روش ناپیوسته.

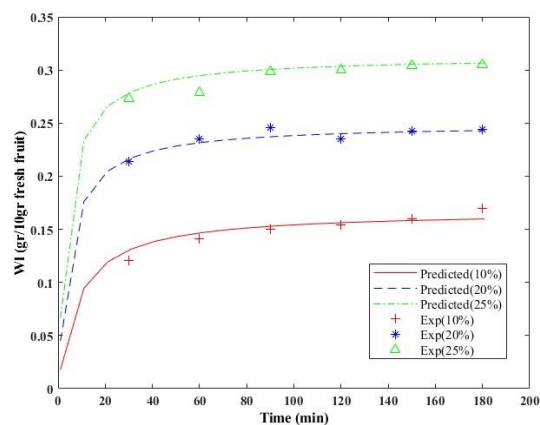
Figure 4. Plots of t/WL against time at a temperature of 50°C and different solute concentration in Batch method.

1. Solid Gain



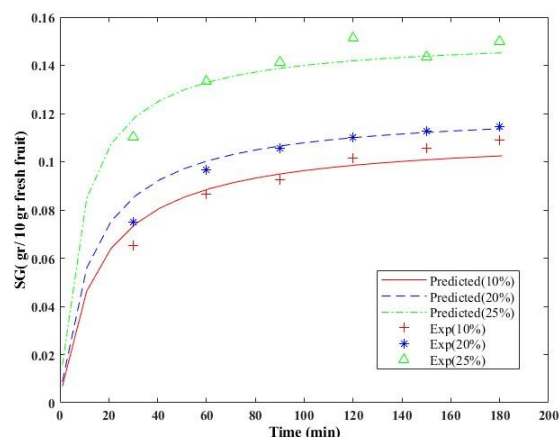
شکل ۵. نمودار t/SG برحسب زمان در دمای $50^{\circ}C$ و غلظت‌های مختلف در روش ناپیوسته.

Figure 5. Plots of t/SG against time at a temperature of $50^{\circ}C$ and different solute concentration in Batch method.



شکل ۶. نمودار WL برحسب زمان در دمای $50^{\circ}C$ و غلظت‌های مختلف در روش ناپیوسته.

Figure 6. Plots of WL against time at a temperature of $50^{\circ}C$ and different solute concentration in Batch method.



شکل ۷. نمودار SG برحسب زمان در دمای $50^{\circ}C$ و غلظت‌های مختلف در روش ناپیوسته.

Figure 7. Plots of SG against time at a temperature of $50^{\circ}C$ and different solute concentration in Batch method.

۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه سلسیوس و غلظت در مقادیر ۱۰، ۲۰ و ۲۵ درصد وزنی بررسی شده است.

۴-۲-۱ بررسی اثر تغییرات غلظت نمک در نمونه‌ها در دماهای ثابت

سیال ورودی به بستر سیال

شکل‌های (۸) تا (۱۰) تغییرات SG را با زمان، در سه دمای انتخابی و سه غلظت متفاوت نشان داده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شدت انتقال جرم یا به عبارتی، شدت جذب نمک، به علت زیادبودن نیروی محرکه در ابتدای فرایند بیشتر است که در ادامه فرایند، به دلیل کاهش نیروی محرکه، کاهش می‌یابد. نیروی محرکه در مورد نمک، اختلاف غلظت است. هم‌چنین شکل‌ها نشان می‌دهد که با افزایش غلظت اولیه محلول اسمزی، مقدار SG افزایش می‌یابد. افزایش غلظت اولیه محلول اسمزی در واقع افزایش پتانسیل اسمزی است، که به دلیل تعداد بیشتر ذرات حل‌شونده (حجم ذرات و نه جرم آن‌ها) باعث افزایش فشار اسمزی در محلول می‌شود. هم‌چنین، با افزایش غلظت محلول و اختلاف غلظت بین محلول و مواد، جامد جذب شده افزایش می‌یابد.

پس از محاسبه WL_{∞} و SG_{∞} در نخودسبز با معادلات (۳) و (۴)، مقادیر D_{es} و D_{ew} به ترتیب از شیب خط $\ln(MR)$ و $\ln(SR)$ بر حسب زمان t حساب شد. نتایج این محاسبات در جدول (۱) آورده شده است. مقادیر غلظت‌های تعادلی و ضرایب نفوذ نشان می‌دهد که با افزایش غلظت نمک در محلول و هم‌چنین، افزایش دما، میزان WL و SG افزایش می‌یابد. نتایج محققان دیگر نیز، این نتایج را تأیید می‌کند [۱۶-۱۴].

همان‌طور که از داده‌های تعادلی به دست آمده از مدل آزورا در جدول فوق مشخص است، می‌توان یک رابطه لگاریتمی بین WL_{∞} و SG_{∞} و دما و غلظت اولیه محلول اسمزی به دست آورد. معادلات زیر با استفاده از نرم‌افزار متلب به دست آمده و بهترین برازش را برای مقادیر WL_{∞} و SG_{∞} ، بر حسب دما و غلظت ارائه داده است:

$$WL_{\infty} = 0.005919C^{0.8065}T^{0.4048} \quad R^2 = 0.978 \quad (19)$$

$$SG_{\infty} = 0.004852C^{0.4338}T^{0.7171} \quad R^2 = 0.908 \quad (20)$$

۴-۲ نتایج تجربی و پیش‌بینی شده به وسیله مدل سازی در

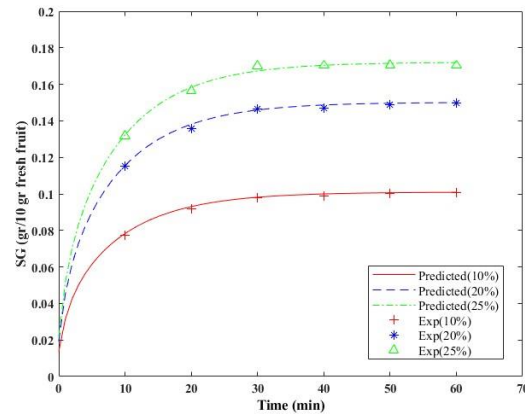
آبدایی اسمزی در فرایند بستر سیالی

برای بررسی تغییرات غلظت آب و نمک در نمونه، دما در سه مقدار

جدول ۱. غلظت‌های تعادلی و ضرایب نفوذ آب و نمک به دست آمده در روش ناپیوسته.

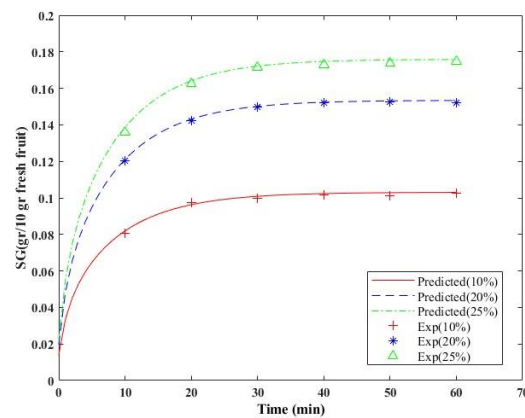
Table 1. Equilibrium concentrations and effective diffusivities of water and salt in Batch method.

RMSE (D_{es})	R ² (D_{es})	$D_{es} \times 10^{10}$ (m ² /s)	RMSE (D_{ew})	R ² (D_{ew})	$D_{ew} \times 10^{10}$ (m ² /s)	RMSE (SG)	R ² (SG)	SG_{∞} (gr/10gr)	RMSE (WL)	R ² (WL)	WL_{∞} (gr/10gr)	Salt concentration (%w/w)	T (°C)
0.061	0.927	0.872	0.059	0.927	3.101	0.069	0.937	0.169	0.061	0.945	0.145	10	30
0.068	0.939	1.091	0.057	0.868	3.260	0.061	0.956	0.180	0.085	0.973	0.258	20	
0.056	0.919	1.848	0.060	0.918	3.593	0.054	0.986	0.250	0.064	0.994	0.330	25	
0.067	0.911	0.962	0.055	0.908	3.287	0.066	0.935	0.188	0.071	0.937	0.157	10	40
0.094	0.907	1.700	0.058	0.970	3.402	0.055	0.937	0.226	0.037	0.992	0.259	20	
0.074	0.871	2.034	0.057	0.975	3.639	0.047	0.898	0.269	0.044	0.996	0.365	25	
0.090	0.860	1.201	0.053	0.974	3.451	0.075	0.978	0.215	0.036	0.960	0.216	10	50
0.088	0.972	1.904	0.059	0.962	3.837	0.051	0.978	0.259	0.042	0.999	0.315	20	
0.081	0.934	2.315	0.061	0.969	3.873	0.065	0.904	0.336	0.050	0.996	0.390	25	



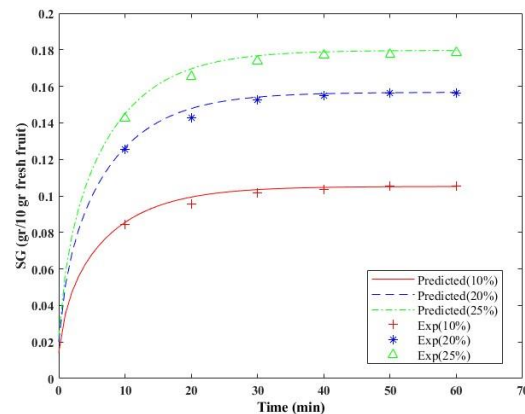
شکل ۸. مقایسه روش مدلسازی و آزمایشگاهی نمک جذب شده در نمونه‌ها در دمای ۳۰°C و غلظت‌های مختلف در فرایند بستر سیال.

Figure 8. Comparison between modeling and experimental method for solid gain in samples against time at a temperature of 30°C and different solute concentration in fluidized bed.



شکل ۹. مقایسه روش مدلسازی و آزمایشگاهی نمک جذب شده در نمونه‌ها در دمای ۴۰°C و غلظت‌های مختلف در فرایند بستر سیال.

Figure 9. Comparison between modeling and experimental method for solid gain in samples against time at a temperature of 40°C and different solute concentration in fluidized bed.



شکل ۱۰. مقایسه روش مدلسازی و آزمایشگاهی نمک جذب شده در نمونه‌ها در دمای ثابت ۵۰°C و غلظت‌های مختلف در فرایند بستر سیال.

Figure 10. Comparison between modeling and experimental method for solid gain in samples against time at a temperature of 50°C and different solute concentration in fluidized bed.

نشان می دهد. براساس نرخ نفوذ نمک در نمونه ها (روند افزایشی)، آب موجود در نمونه ها طبق قانون اسمزیک از آن ها دفع خواهد شد. همان طور که از شکل ها پیدا است، در ابتدای فرایند آبردایی اسمزی، میزان آب کمتری از نمونه ها خارج شده است. در ادامه فرایند، به دلیل به تعادل رسیدن میزان آب موجود در نمونه ها، این روند یکنواخت شده است. روند جذب نمک به داخل نمونه ها و دفع آب از نمونه ها تا زمانی رخ می دهد که فشار اسمزی در داخل نمونه به تعادل برسد. همچنین، شکل ها نشان می دهند که با افزایش غلظت سیال ورودی به بستر، مقدار WL نمونه ها افزایش خواهد یافت.

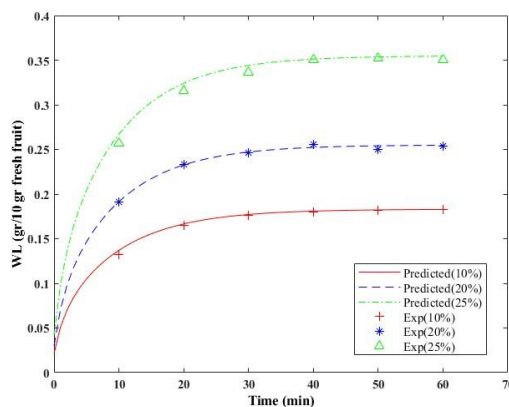
مقدار میانگین خطای نسبی^۱ (MRE) بین مقادیر مدل سازی و آزمایشگاهی در دما و غلظت های مختلف برای SG در جدول (۲) آورده شده است. به عنوان مثال، مقدار MRE در دمای ۵۰ درجه سلسیوس و غلظت های ۱۰، ۲۰ و ۲۵ درصد وزنی به ترتیب برابر ۱/۵، ۱/۲ و ۲/۱ درصد برای SG است که اعداد کوچکی است. همان طور که در اعداد جدول پایین مشخص است، مقدار خطای مدل سازی و آزمایشگاهی بسیار کم است که نشان دهنده تطابق خوبی بین مقادیر پیش بینی شده با مدل ریاضی و مقادیر آزمایشگاهی و از طرفی، صحت مدل ریاضی ارائه شده است.

۲-۲-۴ بررسی اثر تغییرات غلظت آب در نمونه ها در غلظت ثابت و دماهای مختلف سیال
 شکل های (۱۱) تا (۱۳) روند تغییرات WL را در نمونه ها

جدول ۲. مقدار میانگین خطای نسبی بین مقادیر مدل سازی و آزمایشگاهی نمک جذب شده در نمونه ها.

Table 2. Mean Relative Error between modeling and experimental data for solid gain in samples.

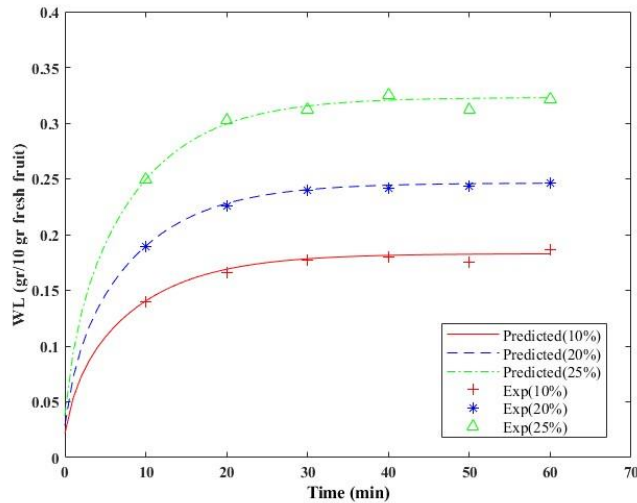
MRE (%)	Salt concentration (%w/w)	T (°C)
0.7	10	30
0.8	20	
1.2	25	
0.6	10	40
1.1	20	
1.8	25	
1.5	10	50
1.2	20	
2.1	25	



شکل ۱۱. مقایسه روش مدل سازی و آزمایشگاهی آب از دست رفته در نمونه ها در دمای ثابت ۳۰ °C و غلظت های مختلف در فرایند بستر سیال.

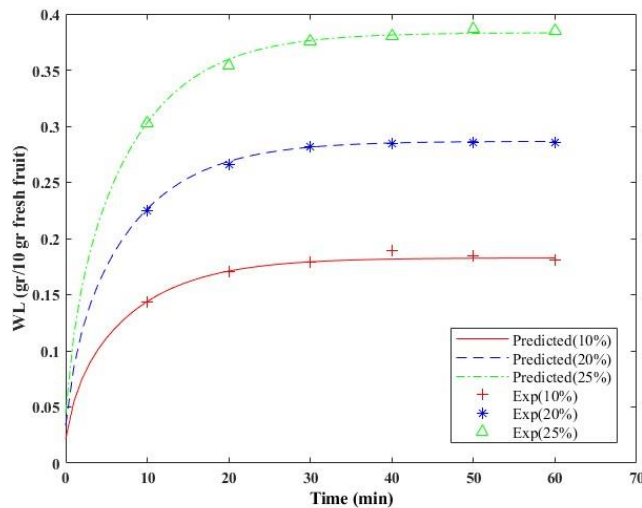
Figure 11. Comparison between modeling and experimental method for water loss in samples against time at a temperature of 30°C and different solute concentration in fluidized bed.

1. Mean Relative Error



شکل ۱۲. مقایسه روش مدل سازی و آزمایشگاهی آب از دست رفته در نمونه ها در دمای ثابت ۴۰ °C و غلظت های مختلف در فرایند بستر سیال.

Figure 12. Comparison between modeling and experimental method for water loss in samples against time at a temperature of 40 °C and different solute concentration in fluidized bed.



شکل ۱۳. مقایسه روش مدل سازی و آزمایشگاهی آب از دست رفته در نمونه ها در دمای ثابت ۵۰ °C و غلظت های مختلف در فرایند بستر سیال.

Figure 13. Comparison between modeling and experimental method for for water loss in samples against time at a temperature of 50°C and different solute concentration in fluidized bed.

کوچکی است. همان طور که اعداد جدول (۳) نشان می دهند، مقدار خطای مدل سازی و آزمایشگاهی در محاسبه WL بسیار کم است و نشان از تطابق درست بین مقادیر پیش بینی شده با مدل ریاضی و مقادیر آزمایشگاهی دارد.

مشابه قسمت قبل، مقدار میانگین خطای نسبی (MRE) بین مقادیر مدل سازی و آزمایشگاهی در دما و غلظت های مختلف برای WL در جدول (۳) آورده شده است. به عنوان مثال، مقدار MRE در دمای ۵۰ درجه سلسیوس و غلظت های ۱۰، ۲۰ و ۲۵ درصد وزنی به ترتیب برابر ۱/۶، ۱/۱۰ و ۱/۲ درصد برای WL است که اعداد

جدول ۳. مقدار میانگین خطای نسبی بین مقادیر مدل‌سازی و آزمایشگاهی آب از دست‌رفته در نمونه‌ها.

Table 2. Mean Relative Error between modeling and experimental data for water loss in samples.

MRE (%)	Salt concentration (%w/w)	T (°C)
1.4	10	30
0.7	20	
2.3	25	
2.7	10	40
1.9	20	
1.0	25	
1.6	10	50
1.0	20	
1.2	25	

بستر سیال نسبت به روش ناپیوسته است. از طرف دیگر، مقادیر WL و SG در فرایند بستر سیال، بعد از مدت‌زمان ۶۰ دقیقه به تعادل رسیده که این مقادیر در روش ناپیوسته به میزان ۱۸۰ دقیقه است که نشان‌دهنده آن است که استفاده از فرایند بستر سیالی، مقادیر بالاتری از WL و SG را در زمان کوتاه‌تری به دست خواهد داد.

۳-۴ مقایسه نتایج آزمایشگاهی در روش ناپیوسته و فرایند بستر سیال

به منظور مقایسه مقادیر WL و SG در دو روش آزمایشگاهی ناپیوسته و فرایند بستر سیال، جدول (۴) ارائه شده است. همان‌طور که در نتایج جدول زیر پیدا است، مقادیر WL و SG در فرایند بستر سیالی، بیشتر از روش ناپیوسته است که نشان‌دهنده برتری فرایند

جدول ۴. مقایسه مقادیر آب از دست‌رفته و جامد جذب‌شده در روش ناپیوسته و فرایند بستر سیال.

Table 4. Comparison between water loss and solid gain in Batch and fluidized bed process.

SG (gr/10gr) Fluidized bed process (after 60 min)	SG (gr/10gr) Batch method (after 180 min)	WL (gr/10gr) Fluidized bed process (after 60 min)	WL (gr/10gr) Batch method (after 180 min)	Salt concentration (%w/w)	T (°C)
0.101	0.089	0.183	0.140	10	30
0.150	0.101	0.255	0.225	20	
0.172	0.138	0.344	0.275	25	
0.104	0.098	0.184	0.149	10	40
0.154	0.109	0.266	0.239	20	
0.178	0.143	0.354	0.289	25	
0.115	0.109	0.196	0.156	10	50
0.157	0.115	0.287	0.245	20	
0.182	0.151	0.382	0.305	25	

۵. نتیجه گیری

در این پژوهش، به بررسی آبدایی اسمزی نخودسبز با دو فرایند ناپیوسته و بستر سیالی پرداخته شد. از محلول آب نمک با غلظت های ۱۰، ۲۰ و ۲۵ درصد وزنی به عنوان محلول اسمزی استفاده شد و دماهای عملیاتی ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه سلسیوس بررسی شد. در هر دو روش مقادیر آب ازدست رفته و جامد جذب شده، حساب شد. نتایج روش ناپیوسته نشان داد که میزان نفوذ آب و نمک در فرایند آبدایی اسمزی نخودسبز به خوبی با مدل آزورا قابل تطبیق و پیش بینی است. همچنین، نتایج تجربی روش ناپیوسته و مدل پیشنهادی نشان دادند که با افزایش غلظت نمک در آب و همچنین، افزایش دمای محلول، مقادیر WL و SG و در نتیجه WL_{∞} و SG_{∞} و همچنین D_{es} و D_{ew} افزایش یافتند. نتایج آزمایشگاهی و مدل سازی فرایند بستر سیالی نشان داد که مقادیر WL و SG ، با افزایش دما و غلظت محلول اسمزی، افزایش یافته است. همچنین، نتایج آزمایشگاهی و مدل سازی فرایند بستر سیالی تطابق خوبی با یکدیگر داشته که نشان دهنده صحت مدل ریاضی ارائه شده است. سرانجام، مقادیر WL و SG در زمان های مختلف در فرایندهای ناپیوسته و بستر سیالی مقایسه شد و نتایج نشان داد که این مقادیر در فرایند بستر سیالی بیشتر از روش ناپیوسته است و همچنین، فرایند بستر سیالی، زمان کمتری برای انجام آزمایش ها به خود اختصاص داده است که برتری استفاده از این روش را نسبت به روش ناپیوسته نشان می دهد.

فهرست نمادها

A_p : سطح مقطع نمونه

C_0 : غلظت اولیه سیال

D_e : ضریب نفوذ مؤثر

m_p : جرم نمونه

dq/dt : تغییرات غلظت در نمونه

q_e : غلظت تعادلی

N : تعداد کل نمونه ها در بستر سیال شده

H : ارتفاع بستر سیال

dz : ارتفاع المان

mr : دبی جرمی سیال

dC : تغییرات غلظت در سیال

S_0 : وزن خشک اولیه

S_t : وزن خشک نمونه در زمان t بعد از اسمز

SG_t : کسر جامد جذب شده در زمان t

SG_{∞} : مقدار تعادلی جامد جذب شده

S_1 : ثابت مدل دو پارامتری مربوطه از دست دادن آب

S_2 : ثابت مدل دو پارامتری مربوطه جذب نمک

r : شعاع نمونه

W_0 : وزن اولیه

W_p : وزن ظرف

W_t : وزن نمونه در زمان t بعد از اسمز

WL_t : کسر آب خارج شده در زمان t

WL_{∞} : مقدار تعادلی آب ازدست رفته

مراجع

- [1] Barton, G. (1975). The Mathematics of Diffusion 2nd edn. *Physics Bulletin*, 26, 11, 500-501. doi: 10.1088/0031-9112/26/11/044.
- [2] Azuara, E., Cortes, R., Garcia, H. S., & Beristain, C. I. (1992). Kinetic model for osmotic dehydration and its relationship with Fick's second law, *International Journal of Food Science + Technology*, 27, 4, 409-418. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1992.tb01206.x>
- [3] Chang, M. J., Han, M. R., & Kim, M.-H. (2003). Effects of salt addition in sugar based osmotic dehydration on mass transfer and browning reaction of green pumpkin, *Journal of Applied Biological Chemistry*, 46, 3, 92-96. <https://doi.org/10.3746/jfn.2003.8.3.230>
- [4] Uddin, M. B., Ainsworth, P., & İbanoğlu, Ş. (2004). Evaluation of mass exchange during osmotic dehydration of carrots using response surface methodology, *Journal of Food Engineering*, 65, 4, 473-477. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.02.007>
- [5] Manzoor, A., Khan, M. A., Mujeebu, M. A., & Shiekh, R. A. (2021). Comparative study of microwave assisted and conventional osmotic dehydration of apple cubes at a constant temperature, *Journal of Agriculture and Food Research*, 5, 100176. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100176>
- [6] Emser, K., Barbosa, J., Teixeira, P., & de Moraes, A. M. M. B. (2017). Lactobacillus plantarum survival during the osmotic dehydration and storage of probiotic cut apple, *Journal of Functional Foods*, 38, 519-528. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.09.021>

- [7] Grzelak-Błaszczak, K., Grzegorzewska, M., & Klewicki, R. (2021). Retention of flavonols in onions after osmotic dehydration, *Lwt*, *150*, 112067. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112067>
- [8] Jokar, A., Parsaii, A., & Maftoon Azad, N. (2020). Oil Absorption Reduction of Eggplant Slices during Deep Fat Frying by Applying Osmotic Dehydration Pretreatment, *Iranian Journal of Nutrition Sciences & Food Technology*, *15*, 1, 59–70, [In Persian].
- [9] Rahman, S. M. A., Sharma, P., & Said, Z. (2022). Application of response surface methodology based D-optimal design for modeling and optimisation of osmotic dehydration of zucchini, *Digital Chemical Engineering*, *4*, 100039. <https://doi.org/10.1016/j.dche.2022.100039>
- [10] Prajapati, P., Porwal, C., Garg, M., Singh, N, Dey Sadhu, S., Chopra, R., Rao, E. S., Agarwal, A., Saeed, M., Obaidur Rab, S., Kumar Mahato, D., Kumar, P., Kamle, M., Dutt Tripathi, A. (2025). Transforming lemon Peel into a sustainable reservoir of bioactives: A green osmotic dehydration strategy, *Food Chemistry: X*, *25*, 102172. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102172>.
- [11] Jin, W., Zhang, M., Mujumdar, A. S., Yu, D. (2024). Influence of ultrasonic-assisted osmotic dehydration pretreatment on hot air-assisted radio frequency drying of bitter melon, *Food Bioscience*, *59*, 103923, <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.103923>.
- [12] Abbasi Souraki, B., Ghaffari, A., & Bayat, Y. (2011). Mathematical Modeling of Mass Transfer during Osmotic Dehydration of Cylindrical Green Bean, *Iranian Chemical Engineering Journal*, *10*, 56, [In Persian].
- [13] Abbasi Souraki, B., Ghanadzadeh Gilani, H., Emami, N., & Tabarsa, M. (2015). Experimental investigation and thermodynamic modeling of pea drying in a discontinuous fluidized bed dryer, *Iranian Chemical Engineering Journal*, *14*, 78. In Persian. https://www.ijche.ir/article_112437.html
- [14] Kaymak-Ertekin, F., Sultanoğlu, M. (2000). Modelling of mass transfer during osmotic dehydration of apples, *Journal of Food Engineering*, *46*, 4, 243–250. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00084-4](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00084-4)
- [15] Azuara, E., Flores, E., & Beristain, C. I. (2009). Water diffusion and concentration profiles during osmodehydration and storage of apple tissue, *Food and Bioprocess Technology*, *2*, 4, 361–367. <http://dx.doi.org/10.1007/s11947-008-0077-7>
- [16] Singh, B., Kumar, A., & Gupta, A. K. (2007). Study of mass transfer kinetics and effective diffusivity during osmotic dehydration of carrot cubes, *Journal of Food Engineering*, *79*, 2, 471–480. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.01.074>