

مطالعه‌ی ضریب نفوذ مؤثر، انرژی فعال‌سازی و مدل‌سازی سینتیک رطوبت‌زنی نخود فرنگی

علی آل‌حسینی^{۱*}، علی رافع^۲، علی فائزین^۳، الهام آل‌حسینی^۴

۱- دانشجوی دکترای مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی، گروه نانو تکنولوژی، پژوهشکده علوم و صنایع غذایی، مشهد، ایران

۲- استادیار، گروه فرآوری مواد غذایی، پژوهشکده علوم و صنایع غذایی، مشهد، ایران

۳- استادیار، گروه طراحی ماشین‌آلات صنایع غذایی، پژوهشکده علوم و صنایع غذایی، مشهد، ایران

۴- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات آیت الله آملی، آمل، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۴/۵/۷ تاریخ پذیرش: ۹۴/۹/۱۹)

چکیده

در این پژوهش، مدل‌سازی جذب آب دانه‌های نخود فرنگی با استفاده از روابط ریاضی انجام شد. مقدار D_{eff} برای دانه‌ی نخود فرنگی $(m^2/s)^{-A}$ $1/69 \times 10$ با ضریب تبیین بالا ($R^2 = 0/97$) به دست آمد. همچنین انرژی فعال‌سازی دانه‌های نخود فرنگی با افزایش محتوای رطوبتی و به دنبال آن افزایش شعاع دانه‌ها در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد، کاهش یافت. ارزیابی مدل پلگ برای توصیف رفتار جذب آب نخود فرنگی، از طریق ضریب تبیین (R^2)، کای اسکور (χ^2)، ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$) و خطای انحراف میانگین (MBE)، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. مقادیر ثابت معادله پلگ k_1 و k_2 به ترتیب برابر با $57/47$ و $-0/130$ بودند.

کلید واژگان: مدل‌سازی، ضریب نفوذ مؤثر، انرژی فعال‌سازی، سینتیک رطوبت‌زنی، نخود فرنگی

* مسئول مکاتبات: Alehosseini.Ali@gmail.com

۱- مقدمه

نخود فرنگی^۱ با نام علمی *Pisum Sativum* گیاهی است علفی و یک ساله از خانواده لگومینه^۲، خودگشن، سرمادوست، دارای شاخه‌های بلند رونده که به منظور استفاده از دانه سبز کشت می‌گردد [۱ و ۲]. سطح زیر کشت و میانگین عملکرد جهانی آن به ترتیب معادل یک میلیون هکتار و ۸/۵ تن در هکتار است. سطح زیر کشت آن در استان گلستان ۱۲۲۲ هکتار با عملکرد حدود ۶/۷ تن در هکتار می‌باشد [۳]. خیساندن، فرآیند کندی است که با نفوذ آب به درون دانه همراه است. خیساندن در آب گرم یکی از روش‌های متداول برای کاهش زمان مرحله خیساندن است، زیرا با افزایش دما، شدت جذب آب نیز افزایش می‌یابد. البته باید دقت داشت که درجه حرارت خیساندن کمتر از دمای ژلاتینه شدن نشاسته باشد، تا شکستن دانه و خروج مواد جامد محلول به حداقل برسد [۴]. این فرآیند به طور عمده یک عمل انتشار^۳ به شمار می‌آید که در اثر نفوذ آب، دانه متورم می‌شود. آب به داخل دانه آنقدر نفوذ می‌کند، تا آن که فشار بخار آب در داخل دانه از فشار بخار آب جذب شده کمتر شود و هنگامی جریان آب متوقف می‌شود که شرایط تعادل به وجود آید [۵]. جذب آب به وسیله‌ی ماده‌ی غذایی، فرآیندی است که در آن مولکول‌های آب به گونه‌ای پیش‌رونده و برگشت‌پذیر از راه‌های جذب شیمیایی، جذب فیزیکی و چگالش^۴ چند لایه‌ای، با مواد جامد غذا ترکیب می‌شوند [۶]. از دست دادن رطوبت و عامل گرما باعث می‌شود که ماده غذایی تغییر شکل داده و ابعاد آن کاهش یابد [۷]. اهمیت ایزوترم جذب رطوبت به عنوان تابعی از دو یا چند دما برای بررسی ترمودینامیکی و مدل‌سازی سنتتیک خشک کردن بسیار کارآمد است و نیز اطلاعات مناسبی در مورد بهبود پایداری مواد غذایی در طول انبارداری در اختیار محقق قرار می‌دهد [۸]. در تحقیقی با استفاده از مدل ریاضی پلگ، سنتتیک جذب آب دانه نخود را در طی فرآیند خیساندن بررسی نموده و نشان دادند که مدل ارائه شده توسط پلگ می‌تواند سنتتیک جذب آب نخود را در طی دماهای مختلف پیش‌بینی نماید. در این مطالعه جذب آب نخود را در محدوده دماهای ۲۰ تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد بررسی نمودند [۹].

همچنین در مطالعه‌ای دیگر، جذب آب در دانه‌های سویا، لوبیای چشم بلبلی و بادام زمینی در دماهای گوناگون و با استفاده از مدل پلگ، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان دادند که ضریب k_1 پلگ در دماهای مختلف، متغیر بود. این در حالی بود که ضریب k_2 پلگ به نسبت تحت تأثیر نبوده و تغییرات محسوسی نداشت. ضریب k_2 می‌تواند به عنوان یک فاکتور در جذب آب محسوب گردد. هرچه مقدار k_2 کمتر باشد، جذب آب بیشتری رخ خواهد داد. میزان جذب آب در دانه لوبیا بیشترین و در بادام زمینی کمترین مقدار بود [۱۰]. در پژوهشی دیگر، تأثیرات اعمال توان‌های مختلف فراصوت (نیروی وارده ۲۰-۹۰ درصد از توان W ۴۶۰) را در زمان‌های مختلف (۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه) روی دانه جو، به منظور تعیین شرایط بهینه برای تسریع کردن نرخ جوانه‌زنی دانه، مورد پژوهش و بررسی قرار دادند. نتایج نشان دادند که اعمال فرآیند فراصوتی در جذب آب و جوانه‌زنی، مؤثر بوده و مدت زمان جوانه‌زنی را به میزان ۳۰-۴۵ درصد کاهش داد. پژوهشگران در این مطالعه، این گونه استدلال نمودند که افزایش درصد جوانه‌زنی با کاهش مدت زمان جوانه‌زنی در دانه‌های تحت تیمار فراصوت قرار گرفته، در نتیجه عمل فراصوت بوده که منجر به توسعه فرآیند جذب آب در دانه، هم‌زمان با خرد و متلاشی شدن پوسته می‌شود [۱۱]. همچنین در مطالعه‌ای دیگر، ایزوترم جذب و دفع رطوبت انجیر در سه دمای ۲۵، ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد تعیین و بررسی شد. نتایج بدست آمده با چهار مدل گب^۵، بت^۶، آگلسیاس-چیریف^۷ و اسوین^۸ مورد بررسی و تجزیه قرار گرفته و بهترین مدلی که بتواند روند منحنی جذب را پیش‌بینی نماید، انتخاب گردید. نتایج نشان داد که بهترین مدل برای توضیح فرآیند جذب در انجیر، مدل گب می‌باشد [۱۲]. گاباس^۹ و همکاران مدلی برای جذب آب در انگور رقم ایتالیایی تعیین نمودند. آنها منحنی‌های هم‌دمای جذبی را در دماهای ۳۵، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۷۵ درجه سانتی‌گراد تعیین کرده و مدل گب را به عنوان بهترین مدل برای برازش داده‌های آزمایش معرفی کردند [۱۳]. طی تحقیقی در ترکیه، منحنی‌های هم‌دمای جذب برگه زردآلو، انجیر و کشمش در دماهای ۲۰ تا ۳۶ درجه سانتی‌گراد تعیین شد و

5. Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB)
6. Branuer-Emmett-Teller (BET)
7. Iglesias and Chirife
8. Oswin
9. Gabbas

1. Pea garden
2. Legomines
3. Diffusion
4. Condensation

پایه‌ی هر نمونه با خشک کردن حدود ۵ تا ۱۰ گرم نمونه در آون 103 ± 2 درجه‌ی سانتی‌گراد (آون Memmert، مدل: 600 D 06062، ساخت آلمان) تا رسیدن به رطوبت ثابت تعیین شد [۱۵]. رطوبت پایه دانه‌های تهیه شده، ۱۰ درصد در مبنای مرطوب بود. مقادیر محاسبه شده‌ای از آب مقطر به نمونه‌ها، جهت تهیه‌ی نمونه‌هایی با درصد رطوبت بالاتر و مطابق با سطوح رطوبتی مورد نظر در آزمون افزوده شد. مقدار آب مقطر افزوده شده با استفاده از رابطه‌ی ۱ محاسبه شد [۱ و ۲].

$$Q = \frac{W_i (M_f - M_i)}{100 - M_f}$$

فهرست نمایه‌های به کار رفته در این پژوهش در جدول ۱ آمده است. پس از افزودن آب مقطر به نمونه‌ی موجود در یک کیسه‌ی پلی‌اتیلنی و همزدن، درب کیسه دوخته شده و به مدت مورد نیاز، جهت توزیع یکنواخت رطوبت در سراسر دانه‌ها، در محیط یخچال در دمای 5 ± 1 درجه‌ی سانتی‌گراد قرار گرفت.

مدل گب به عنوان مناسب‌ترین مدل برای تعیین رطوبت تعادلی ارائه گردید [۱۴]. با توجه به اینکه تا کنون هیچ پژوهشی در مورد رطوبت‌افزایی نخود فرنگی صورت نپذیرفته است، لذا هدف از این تحقیق، مطالعه‌ی و تعیین ضریب نفوذ مؤثر، انرژی فعال‌سازی و مدل‌سازی سینتیک رطوبت‌زنی نخود فرنگی بود تا بتوان براساس الگوی بدست آمده از مدل، روند رطوبت‌افزایی محصول را پیش‌بینی نمود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تعیین میزان رطوبت پایه و رطوبت‌افزایی

این تحقیق روی نخود فرنگی انجام شد. دانه‌ی نخود فرنگی رقم مورد نظر از مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان تهیه شدند. دانه‌ها به صورت دستی تمیز و دانه‌های شکسته، معیوب و ذرات خارجی جدا گشته و در کیسه‌های نایلونی از جنس پلی‌اتیلن و در محیط آزمایشگاه (دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد) نگهداری شدند. میزان رطوبت

جدول ۱ فهرست نمایه‌ها

Pre	محاسباتی (پیش‌بینی شده)	D_{eff}	$(\frac{m^2}{s})$	نفوذ مؤثر
Exp	آزمایشی (تجربی)	D_0	$(\frac{m^2}{s})$	فاکتور پیش‌نمایی معادله آرنیوس
R^2	ضریب همبستگی	E_a	$(\frac{KJ}{mol})$	انرژی اکتیواسیون
T	دمای مطلق برحسب کلوین	M_t	$(\frac{Kg_{water}}{Kg_{DW}})$	مقدار رطوبت در زمان t
t	زمان رطوبت‌زنی (دقیقه)	M_e	$(\frac{Kg_{water}}{Kg_{DW}})$	مقدار رطوبت تعادلی
Z	تعداد ضرایب ثابت مدل	M_0	$(\frac{Kg_{water}}{Kg_{DW}})$	مقدار رطوبت اولیه
χ^2	کاهش کای‌اسکور	N		تعداد داده‌ها
RMSE	ریشه میانگین مربعات خطا	MR		رطوبت نسبی
MBE	خطای انحراف میانگین	M_t^{exp}		مقدار رطوبت تجربی
r	شعاع کره (میلی‌متر)	M_t^{pre}		مقدار رطوبت پیش‌بینی شده
R	ثابت جهانی گازها $(\frac{KJ}{mol \cdot K})$	Q		جرم آب مقطر افزوده شده (گرم)
K_0	شیب خط	W_i		جرم اولیه‌ی نمونه
m_f	میزان رطوبت نهایی	a		طول (میلی‌متر)
m_i	میزان رطوبت اولیه‌ی نمونه برحسب وزن مرطوب (درصد)	c		ضخامت (میلی‌متر)
b	عرض (میلی‌متر)	K_1		ثابت شدت جذب آب پلگ
D_g	قطر هندسی (میلی‌متر)	K_2		ثابت ظرفیت پلگ

۲-۲- اندازه‌گیری ویژگی‌های هندسی

به منظور تعیین شعاع دانه‌های نخود فرنگی، ۱۰۰ دانه به صورت تصادفی انتخاب و سه بعد اصلی آن شامل قطر بزرگ (طول)، قطر متوسط (عرض) و قطر کوچک (ضخامت) با استفاده از کولیس دیجیتال (مدل Anyi، ساخت چین) با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر در هر سطح رطوبتی مورد نظر در آزمایش اندازه‌گیری شد. در هر سطح رطوبتی، میانگین قطر هندسی (D_g) با استفاده از رابطه‌ی ۲ محاسبه گردید [۱۶].

$$D_g = \sqrt[3]{abc}$$

۲-۳- تعیین ضریب انتشار رطوبت

امروزه در صنایع غذایی، انتقال رطوبت در مواد غذایی موضوع بسیار مهمی است. شمار مکانیسم‌های انتقال رطوبت، گسترده و اغلب پیچیده است. پدیده‌های انتقال معمولاً برحسب نفوذ فشاری، نفوذ اجباری و نفوذ معمولی^۱ طبقه‌بندی می‌شود. به منظور بررسی داده‌های آزمایشگاهی، محاسبه‌ی نسبت رطوبت در گام نخست ضروری بود. نسبت رطوبت نشان دهنده مقدار رطوبت نمونه‌های نخود فرنگی در هر لحظه نسبت به رطوبت اولیه و نهایی بود و از رابطه‌ی ۳ بدست آمد:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e}$$

در این نوع از پژوهش‌ها، اغلب یک مکانیسم انتقال نفوذ فرض شده و سپس با صرف‌نظر از این که مکانیسم انتخابی در انتقال رطوبت نقش دارد یا خیر، سرعت انتقال رطوبت به وسیله‌ی یک ارزش نفوذ مؤثر یا D_{eff} تعریف می‌شود. پارامترهای لازم در این شیوه مدل‌سازی فقط ابعاد نمونه و ضریب نفوذ مؤثر^۲ می‌باشند. در این راستا قانون فیک^۳ (رابطه ۴)، اغلب برای توصیف پدیده‌ی نفوذ رطوبت به کار می‌رود [۱۷ و ۱۸].

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2}$$

در رابطه‌ی ۴، پارامتر X مقدار رطوبت موضعی در مبنای خشک، t زمان و X مختصه‌ی فضایی^۴ می‌باشد. برای به کار بردن قانون فیک، فرض می‌شود که فرآوردی غذایی تک بعدی است، رطوبت اولیه یکنواختی دارد و دارای حرکت درونی رطوبت به مثابه‌ی مقاومت اصلی در برابر انتقال رطوبت است. حل تحلیلی معادله فیک برای یک کره^۵ به صورت رابطه‌ی ۵ می‌باشد.

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 D_{eff} t}{r^2}\right)$$

ضریب نفوذ مؤثر از طریق محاسبه‌ی شیب معادله‌ی زیر بدست آمد:

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(\frac{n^2 D_{eff} t}{r^2}\right)$$

معمولاً ضریب نفوذ مؤثر با رسم داده‌های تجربی خشک کردن برحسب $Ln MR$ نسبت به زمان تعیین می‌گردد. در این راستا نمودار مقدار $Ln MR$ نسبت به زمان رسم گردید و شیب خط بدست آمده در رابطه‌ی ۷ قرار داده شد تا ضریب نفوذ مؤثر بدست آید [۶].

$$K_0 = \frac{\pi^2 D_{eff}}{r^2}$$

۲-۴- محاسبه‌ی انرژی اکتیواسیون

با توجه به تابعیت وابستگی ضریب نفوذ مؤثر با دما، برای تعیین انرژی فعال‌سازی رطوبت از رابطه‌ی آرنیوس استفاده شد [۱۷ و ۱۹].

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(\frac{E_a}{R}\right) \cdot \frac{1}{T}$$

می‌توان با لگاریتم‌گیری از رابطه‌ی ۸ آن را به صورت رابطه‌ی خطی ۹ در آورد:

$$\ln D_{eff} = \ln D_0 - \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T}\right)$$

همچنین انرژی فعال‌سازی را می‌توان با ترسیم $\ln D_{eff}$ برحسب $1/T$ تعیین نمود [۶].

^۱ - انتقال خاص ماده بدون حرکت سیال، نفوذ معمولی نام دارد.

2. Effective Diffusion Coefficient

3. Fick's Law

4. Spatial Coordinate

5. Sphere

۲-۵- مدل سازی ریاضی منحنی جذب آب

روابط بین محتوای رطوبت لحظه‌ای دانه‌ها و زمان غوطه‌وری آنها در آب، توسط مدل‌های مختلفی بیان شده است. معادله پلگ، مدل تجربی غیرتوانی مشهوری است و تعدادی از پارامترهای آن در سینتیک جذب آب بسیار مهم می‌باشند [۲۰ و ۲۱]. مدل ارائه شده توسط پلگ مطابق رابطه‌ی ۱۰ بیان می‌شود:

$$M_t = M_0 \pm \frac{t}{k_1 + k_2 t}$$

با بازنویسی این معادله می‌توان آن را به شکل رابطه‌ی رگرسیونی خطی زیر تبدیل نمود.

$$\frac{t}{M_t - M_0} = k_1 + k_2 t$$

با معلوم بودن رطوبت اولیه، رطوبت لحظه‌ای و زمان غوطه‌وری، ضرایب معادله پلگ بدست آمد. همچنین به منظور بررسی مدل توصیف‌کننده سینتیک رطوبت‌افزایی نخود فرنگی، ضریب همبستگی^۱ (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا^۲ ($RMSE$)، کای اسکور^۳ (χ^2) و خطای انحراف میانگین (MBE) بین داده‌های تجربی و نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل محاسبه گردید. این معیارها، توسط روابط ۱۲ تا ۱۴ تعیین شدند.

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_{t_{pre,i}} - M_{t_{exp,i}})^2 \right]^{1/2}$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (M_{t_{exp,i}} - M_{t_{pre,i}})^2}{N - Z}$$

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_{t_{pre,i}} - M_{t_{exp,i}})$$

روابط ۱۲ تا ۱۴، رطوبت دانه‌ی نخود فرنگی مشاهده شده در i امین اندازه‌گیری، رطوبت دانه‌ی نخود فرنگی پیش‌بینی شده از مدل در i امین اندازه‌گیری، N تعداد مشاهدات (داده‌ها) و Z تعداد ضرایب ثابت بکار رفته در مدل می‌باشد. همچنین به منظور سنجش مدل جهت پیش‌بینی

نحوه‌ی رطوبت‌افزایی دانه‌ی نخود فرنگی، چهار معیار R^2 ، $RMSE$ ، χ^2 و MBE مورد ارزیابی قرار گرفتند [۲۲-۲۴].

۲-۶- آنالیز حساسیت مدل

جهت تعیین میزان حساسیت مدل شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار، نمودار داده‌های پیش‌بینی شده برحسب داده‌های تجربی ترسیم گردید. بالا بودن مقدار شیب خط رگرسیون و ضریب تبیین، نشان دهنده دقت و صحت مدل در پیش‌گویی فرآیند رطوبت‌افزایی توسط مدل مذکور در نظر گرفته شد [۲۲].

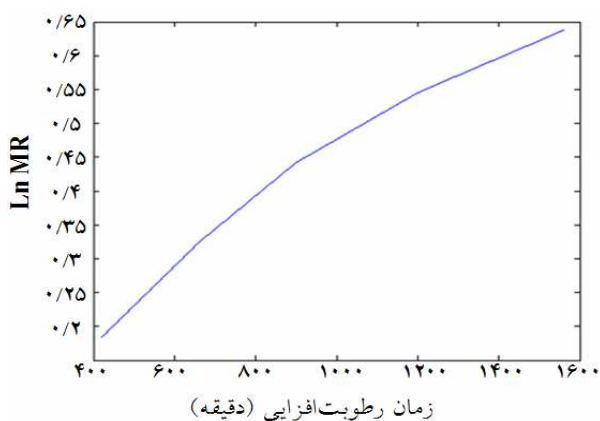
۲-۷- تجزیه و تحلیل داده‌ها

تمامی آزمایشات در پنج تکرار انجام شد. سطوح رطوبتی مورد آزمون به ترتیب ۱۱/۱۰، ۱۶/۹۵، ۲۳/۴۵، ۳۰/۷۰، ۳۹ و ۴۸/۱۴ درصد بر مبنای وزن خشک بود. در این مطالعه، تجزیه و تحلیل داده‌ها، عملکردها و مدل ریاضی توسط نرم‌افزار MATLAB R2011a مدل‌سازی گردید.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- انتشار رطوبت مؤثر

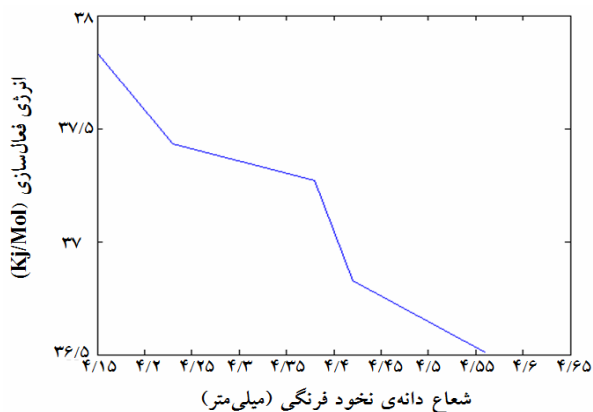
شکل ۱ نمودار لگاریتمی تغییرات نسبت رطوبت در مقابل زمان را برای دانه‌ی نخود فرنگی نشان می‌دهد. مقدار D_{eff} برای دانه‌ی نخود فرنگی 1.79×10^{-8} (m^2/s) محاسبه گردید (جدول ۲).



شکل ۱ Ln MR نسبت به زمان رطوبت‌افزایی

1. Correlation Coefficient
2. Root mean Square Error
3. Chi-Square

نشان می‌دهد که رطوبت نسبی نمونه‌های نخود فرنگی در طول زمان، افزایش می‌یابد.

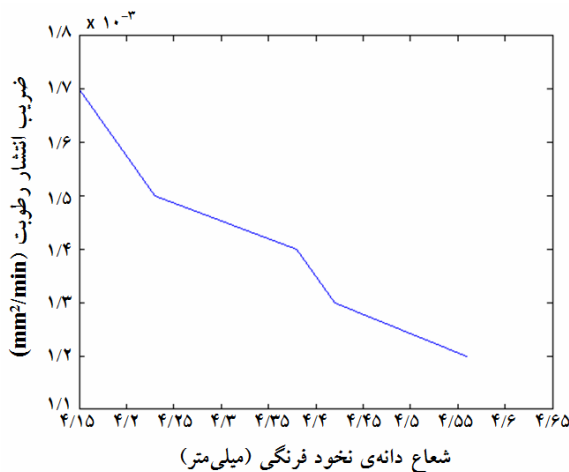


شکل ۳ نمودار انرژی فعال‌سازی با شعاع دانه‌های نخود فرنگی در طول رطوبت‌افزایی در دمای ۵ درجه‌سانتی‌گراد

در طی مراحل مختلف آبیگری، آب به آرامی به درون دانه‌های نخود فرنگی انتشار می‌یابد و سرانجام محتوای رطوبتی به میزان ثابتی می‌رسد. شدت جذب آب در ابتدای عملیات سریع و با گذشت زمان کند گشته و میزان خروج مواد جامد محلول نخود فرنگی نیز افزایش می‌یابد. خروج مواد جامد محلول در مسیر معکوس جذب آب می‌تواند به عنوان عاملی مقاوم در برابر جذب آب باشد [۴].

پژوهشگران مختلف نیز روند مشابهی را برای چنین شرایطی گزارش کرده‌اند [۲۵]. از دلایل دیگر میزان جذب آب، اختلاف محتوای رطوبت در زمان اشباع و در زمان اعمال تیمار خیساندن می‌باشد که این اختلاف، نیروی محرک جذب آب نامیده می‌شود. دلیل این پدیده اختلاف در غلظت مواد جامد و نیروی اسمزی می‌باشد که باعث جذب آب به داخل دانه می‌شود. همزمان با جذب آب، مقداری از مواد جامد دانه نیز به آب خیساندن وارد می‌شود که تحت عنوان میزان اتلاف مواد جامد نامیده می‌شود. عامل این امر نیز پدیده انتشار می‌باشد. با پیشروی فرآیند جذب، محتوی رطوبت افزایش می‌یابد. با گذشت زمان، نیروی محرک و در نهایت میزان جذب کاهش می‌یابد. وقتی که دانه‌ها به محتوای رطوبت تعادلی رسیدند، فرآیند جذب آب متوقف می‌شود [۲۶].

شکل ۲ تغییرات ضریب نفوذ مؤثر را در مقابل تغییرات شعاع دانه‌ی نخود فرنگی در دمای ۵ درجه‌سانتی‌گراد، طی رطوبت‌زنی نمونه مورد نظر نشان می‌دهد. مطابق شکل، در پی بالا رفتن رطوبت و به دنبال آن افزایش شعاع دانه‌ی نخود فرنگی، میزان ضریب انتشار رطوبت کاهش یافت.



شکل ۲ نمودار ضریب انتشار رطوبت با شعاع دانه‌های نخود فرنگی در طول رطوبت‌افزایی در دمای ۵ درجه‌سانتی‌گراد
جدول ۲ مقدار انتشار رطوبت مؤثر بدست آمده برای دانه‌ی نخود فرنگی

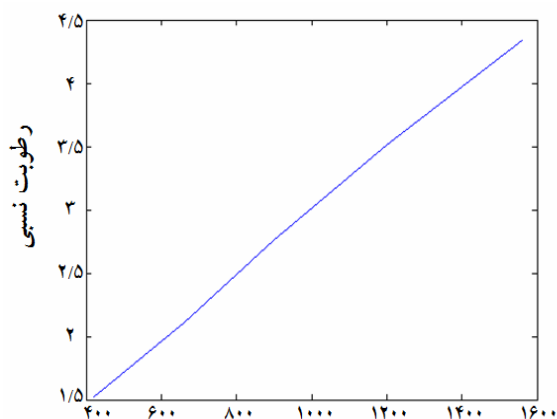
معادله رگرسیون	R ²	D _{eff}
y = 0.0009x + 0.1181	0.97	1/69 × 10 ⁻⁸

۲-۳- انرژی اکتیواسیون

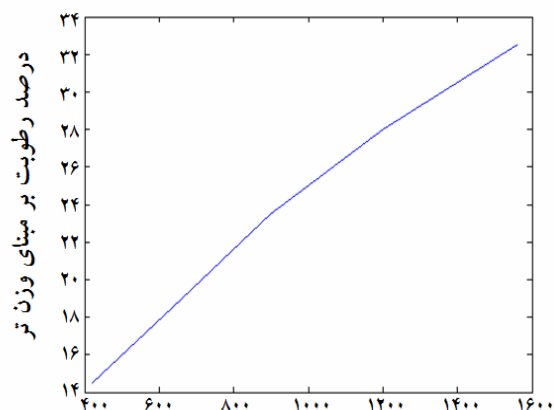
انرژی فعال‌سازی نشان دهنده رابطه بین دمای فرآیند و ضریب نفوذ رطوبت می‌باشد. نتایج نشان داد، انرژی فعال‌سازی دانه‌های نخود فرنگی با افزایش محتوای رطوبتی و به دنبال آن افزایش شعاع دانه‌های نخود فرنگی در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد کاهش یافت (شکل ۳).

۳-۳- سینتیک رطوبت‌افزایی

شکل (۴-الف) مدت زمان لازم برای رطوبت‌افزایی نخود فرنگی از مقدار رطوبت اولیه ۱۰ درصد بر مبنای مرطوب تا مقدار رطوبت نهایی ۳۲/۵ درصد در مبنای تر برای دمای ۵ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. همچنین شکل (۴-ب)

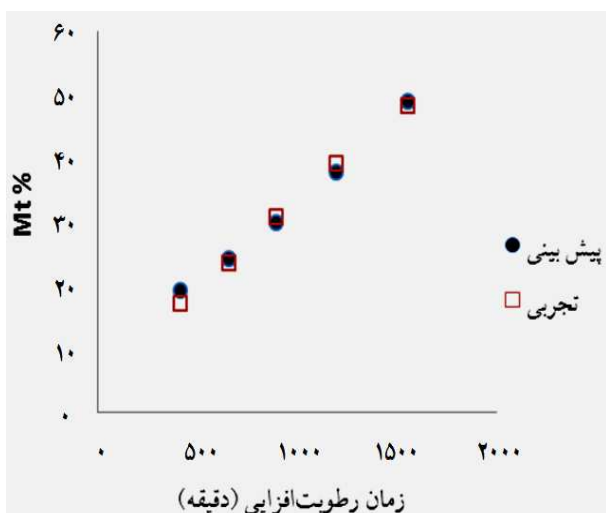


ب: زمان رطوبت افزایشی (دقیقه)



الف: زمان رطوبت افزایشی (دقیقه)

شکل ۴ سینتیک رطوبت افزایشی دانه‌ی نخود فرنگی



شکل ۵ تغییرات رطوبت در طی زمان حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های مدل منتخب

همچنین ثابت‌های رطوبت‌افزایی و ضرایب مدل رگرسیونی منتخب، در جدول ۳ آمده است. شکل ۶ مقادیر پیش‌بینی شده و تجربی رطوبت نسبی دانه‌ی نخود فرنگی را در طی رطوبت‌افزایی نشان می‌دهد.

۳-۴- مدل‌سازی منحنی جذب آب نخود

فرنگی

داده‌های جذب آب نمونه‌های نخود تحت شرایط آزمایشگاهی با معادله پلگ که یک مدل تجربی می‌باشد برازش مناسبی داشتند (شکل ۵) و این مدل رفتار جذب آب دانه‌ها را به طور مناسبی توضیح داد و بنابراین مدل پلگ می‌تواند برای تخمین محتوای رطوبت دانه نخود فرنگی در شرایط آزمایشی معین، به کار برده شود.

ضریب نرخ ثابت k_1 میزان جذب آب را در مراحل اولیه فرایند جذب نشان می‌دهد. پارامترهای آماری مورد آزمون شامل R^2 ، χ^2 ، $RMSE$ و MBE بودند. مقادیر آنالیز آماری برای هر یک از پارامترها، در جدول ۳ نمایش داده شده است.

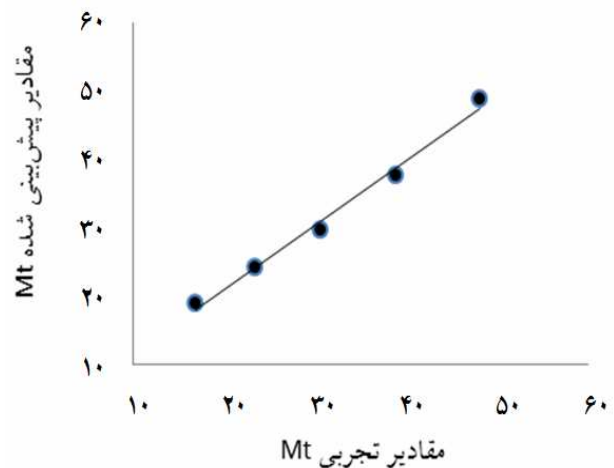
با توجه به مقادیر بالای ضریب تبیین (به عنوان اولین شاخص) و مقادیر پایین کای اسکور و ریشه میانگین مربعات خطا، مدل رگرسیونی پلگ تغییرات رطوبت در طی رطوبت‌افزایی را به خوبی برازش نمود.

جدول ۳ نتایج آماری مدل‌های رطوبت‌افزایی دانه‌ی نخود فرنگی و مقادیر ثابت مدل‌های ریاضی مورد استفاده برای برازش داده‌ها

مقادیر ثابت معادله		MBE	$RMSE$	χ^2	R^2	مدل
K_2	K_1					
-۰/۰۱۳۰	۵۷/۴۷	۰/۲۴۶	۱/۲۳	۲/۵۴	۰/۹۸۷	پلگ

Conference on agricultural products losses university. (In Persian).

- [3] Mokhtarpour, H., Bahram, R., Zyadloo, S., and Karimian, A. 2001. Agriculture in Golestan province (technical guidelines and horticultural crop production). New Thought Publications. (In Persian).
- [4] Abughannam, N. and McKenna, B. 1997. Hydration kinetics of red kidney beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of food science*, 62(3): 520-523.
- [5] Chakraverty, A., Paul, S., and Chakraverty, A. 2001. Postharvest technology: cereals, pulses, fruits and vegetables. Science Publishers, Inc.
- [6] Tavakolipour, H. 2008. Principle of drying of food materials agricultural products. Ayige. 2nd ed. (In Persian).
- [7] Mayor, L. and Sereno, A. 2004. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering*, 61(3): 373-386.
- [8] Labuza, T., Kaanane, A., and Chen, J. 1985. Effect of temperature on the moisture sorption isotherms and water activity shift of two dehydrated foods. *Journal of Food Science*, 50(2): 385-392.
- [9] Turhan, M., Sayar, S., and Gunasekaran, S. 2002. Application of Peleg model to study water absorption in chickpea during soaking. *Journal of food engineering*, 53(2): 153-159.
- [10] Sopade, P. and Obekpa, J. 1990. Modelling water absorption in soybean, cowpea and peanuts at three temperatures using Peleg's equation. *Journal of food science*, 55(4): 1084-1087.
- [11] Yaldagard, M., Mortazavi, S.A., and Tabatabaie, F. 2008. Application of ultrasonic waves as a priming technique for accelerating and enhancing the germination of barley seed: Optimization of method by the Taguchi approach. *Journal of the Institute of Brewing*, 114(1): 14-21.
- [12] Pacco, H.C., Vigneault, C., Menegalli, F.C., de Castro, L.R., and Cortez, L.A. 2008. Evaluation of sorption isotherm models for figs. *Canadian Biosystems Engineering*, 50.
- [13] Gabas, A., Telis-Romero, J., and Menegalli, F. 1999. Thermodynamic models for water sorption by grape skin and pulp. *Drying technology*, 17(4-5): 962-974.
- [14] Rahman, M.S. 2009. Food properties handbook. CRC press.
- [15] Standard, A. 2001. Moisture measurement-unground grain and seeds.



شکل ۶ مقادیر پیش‌بینی شده و تجربی رطوبت

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه ضریب نفوذ مؤثر، انرژی فعال‌سازی و مدل‌سازی سینتیک رطوبت‌زنی نخود فرنگی مورد بررسی قرار گرفت. بررسی رفتار جذب آب دانه‌ها طی فرایند خیساندن نشان داد که میزان رطوبت در مرحله ابتدایی به سرعت افزایش یافت. بعد از آن، نرخ جذب آب کاهش یافت تا زمانی که به محتوای رطوبت تعادلی یا نقطه اشباع رسید و سرانجام به محتوای رطوبتی ثابتی رسید. در پی بالا رفتن رطوبت و به دنبال آن افزایش شعاع دانه‌ی نخود فرنگی، میزان ضریب انتشار رطوبت کاهش یافت. مدل پلگ برای شبیه‌سازی پیش‌بینی محتوای رطوبت جذب شده دانه نخود فرنگی در طی زمان رطوبت‌افزایی در آب دارای R^2 بالا، $RMSE$ و MBE پایین بود ($R^2=0/987$).

۵- منابع

- [1] Alehosseini, A., Tavakolipour, H., Ghodsevali, A.R., and Jafari, S.M. 2011. Evaluation of the effect of moisture content on friction and aerodynamic characteristics of two pea cultivars Golestan province. The first international conference on supply chain optimization, distribution and use in the food industry. (In Persian).
- [2] Alehosseini, A., Tavakolipour, H., Ghodsevali, A.R., and Jafari, S.M. 2011. Evaluation of the effect of moisture on the gravitational properties of pea cultivars Golestan province. Fifth National

- [22] Kashaninejad, M., Mortazavi, A., Safekordi, A., and Tabil, L. 2007. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. *Journal of Food Engineering*, 78(1): 98-108.
- [23] Krokida, M.K., Karathanos, V., Maroulis, Z., and Marinos-Kouris, D. 2003. Drying kinetics of some vegetables. *Journal of Food engineering*, 59(4): 391-403.
- [24] Lomauro, C., Bakshi, A., and Labuza, T. 1985. Moisture transfer properties of dry and semimoist foods. *Journal of Food Science*, 50(2): 397-400.
- [25] Kitamura, Y., Yamada, K., and Yumoto, T. 1990. The initial absorption of water and the manifestation of physiological activities by barley kernels. *Monatsschrift für Brauwissenschaft*, 43(6): 216-220.
- [26] Resio, A.C., Aguerre, R.J., and Suarez, C. 2006. Hydration kinetics of amaranth grain. *Journal of food engineering*, 72(3): 247-253.
- American Society of Agricultural Engineers: 567-568.
- [16] McCabe, W.L., Smith, J.C., and Harriott, P. 1993. *Unit operations of chemical engineering*. Vol. 5. McGraw-Hill New York.
- [17] Sacilik, K., Keskin, R., and Elicin, A.K. 2006. Mathematical modelling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato. *Journal of food Engineering*, 73(3): 231-238.
- [18] Doymaz, I. 2007. Air-drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food Engineering*, 78(4): 1291-1297.
- [19] Mwithiga, G. and Olwal, J.O. 2005. The drying kinetics of kale (*Brassica oleracea*) in a convective hot air dryer. *Journal of Food engineering*, 71(4): 373-378.
- [20] Peleg, M. 2006. An empirical model for the description of moisture sorption curves. *Journal of Food science*, (53): 1216-1217.
- [21] Cunningham, S., Mcminn, W., Magee, T., and Richardson, P. 2008. Effect of processing conditions on the water absorption and texture kinetics of potato. *Journal of Food Engineering*, 84(2): 214-223.

Study of the effective diffusion coefficient, activation energy, and modeling humidification kinetic of pea garden

Alehosseini, A. ^{1*}, Rafe, A. ², Faezian, A. ³, Alehosseini, E. ⁴

1. PhD. Student of Food Materials and Process Design Engineering, Department of Food Nanotechnology, Research Institute of Food Science & Technology (RIFST), Mashhad, Iran.
 2. Assistant Professor, Department of Food Processing, Research Institute of Food Science and Technology (RIFST), Mashhad, Iran.
 3. Assistant Professor, Department of Food Machinery design, Research Institute of Food Science and Technology (RIFST), Mashhad, Iran.
 4. Graduated Master of Science, Department of Food Materials and Process Design Engineering, Islamic Azad University, Ayatollah Amoli Science and Research Branch, Amol, Iran.
- (Received: 94/5/7 Accepted: 94/9/19)

In this research, modeling water absorption pea seeds was done using mathematical equations. D_{eff} value, determinate for Pea (m^2/s) 1.69×10^{-8} with a high coefficient of determination ($R^2 = 0.97$). Also, the activation energy of pea seeds with increasing moisture content and the radius of the seeds at 5° C, decreased. Evaluation model to describe the behavior of water absorption lid pea, by coefficient of determination (R^2), chi-square (χ^2), root mean square error ($RMSE$) and mean bias error (MBE), were analyzed. Constants amounts *Peleg's* equation (k_1, k_2) were 57.47, and -0.013 respectively.

Keywords: Modeling, Effective Diffusion Coefficient, Activation Energy, Humidification Kinetic, Pea garden.

* Corresponding Author E-mail Address: Alehosseini.Ali@gmail.com