

اللَّهُمَّ  
الْحَمْدُ

دانشکده فنی  
گروه مهندسی شیمی

بررسی تجربی و مدل سازی ریاضی فرآیند استخراج  
نشاسته از سیب زمینی

از:

ریحانه حسن زاده

استاد راهنما:

دکتر بهروز عباسی سورکی

استادان مشاور:

مهندس سیده زینب میرنظامی

مهندس سید هادی سیدی

شهریور ۱۳۹۳

ماحصل آن چه راکه آموخته ام، تقدیم می کنم به

پدر پر تلاش و فداکارم،

مادر صبور و مهربانم،

و همه آزاد مردمانی که با علم و عمل خویش آبادگران این سرزمین اند.

«منت خدای راعزو جل که طاعتش موجب قربت است و به سگر اندرش فرید نعمت»؛

«من لم یسکر المخلوق لم یسکر الخالق»؛

به رسم ادب از زحمات و حمایت های بی شائبه ی استاد کراتقدرم، جناب آقای دکتر عباسی صمیمانه قدردانی می کنم که با راهنمایی های دلسوزانه ی خویش هدایت گرایانجام در دوران تحصیل بودند. همیظور شایسته است تا از جناب آقای دکتر خیاظمی که با راهنمایی های خویش در انجام این پژوهش مرایاری نمودند و همچنین از سرکار خانم مهندس میر نظامی و جناب آقای مهندس سیدی که امر مشاوره ی پایان نامه ی مراد پذیرفتند، پاسکزاری کنم. در انتها نیز از خانواده ی عزیزم و دوستان مهربانم که با دلگرمی ها و پشتیبانی هایشان همواره در کنارم بودند، بی نهایت ممنون و سگرم.

ر	چکیده‌ی فارسی	
ز	چکیده‌ی انگلیسی	
۱	فصل اول : مقدمه	
۷	فصل دوم : استخراج نشاسته از سیبزمینی	
۸-۲	۱-۲. فرایند استخراج از جامد با حلال	۸
۹-۲	۲-۲. عوامل مؤثر بر سرعت استخراج از جامد	۹
۱۲-۲	۳-۲. عملیات آماده کردن مواد قبل از انجام فرایند استخراج	۱۲
۱۳-۲	۴-۲. انواع روش‌های استخراج و تجهیزات آن	۱۳
۱۴-۲	۱-۴-۲. لیچینگ در بستر ثابتی از جامدات	۱۴
۱۵-۲	۲-۴-۲. لیچینگ در بستر متحرک	۱۵
۱۸-۲	۳-۴-۲. لیچینگ به روش پراکندگی در حلال	۱۸
۱۹-۲	۵-۲. روش‌های بهبود فرایند استخراج با حلال	۱۹
۲۲-۲	۶-۲. نگاهی کلی بر اهمیت سیبزمینی در صنایع غذایی	۲۲
۲۳-۲	۱-۶-۲. ترکیب شیمیایی سیبزمینی	۲۳
۲۴-۲	۷-۲. معرفی نشاسته و کاربردهای آن	۲۴
۲۵-۲	۱-۷-۲. ترکیب شیمیایی و ساختار مولکولی	۲۵
۲۶-۲	۲-۷-۲. خواص فیزیکی	۲۶
۲۷-۲	۳-۷-۲. منابع گوناگون تولید نشاسته و خصوصیات آن‌ها	۲۷
۲۸-۲	۴-۷-۲. مصارف نشاسته‌ی سیبزمینی	۲۸
۲۹-۲	۸-۲. پروتئین سیبزمینی	۲۹
۲۹-۲	۹-۲. تولید نشاسته و پروتئین سیبزمینی در صنعت	۲۹
۳۰-۲	۱-۹-۲. خرد کردن	۳۰
۳۱-۲	۲-۹-۲. خارج کردن شیرهی سیبزمینی	۳۱
۳۱-۲	۳-۹-۲. جدا کردن فیبر	۳۱
۳۲-۲	۴-۹-۲. خالص‌سازی نشاسته	۳۲
۳۳-۲	۵-۹-۲. تصفیه‌ی نشاسته	۳۳
۳۳-۲	۶-۹-۲. استخراج فرعی	۳۳
۳۴-۲	۷-۹-۲. خارج کردن رطوبت نشاسته و ذخیره‌سازی	۳۴
۳۵-۲	۸-۹-۲. بازیابی پروتئین از شیرهی سیبزمینی	۳۵
۳۶	فصل سوم : بررسی پیشینه‌ی پژوهش	
۴۷	فصل چهارم: مدل‌سازی ریاضی انتقال جرم در فرایند استخراج از جامد	
۴۸-۴	۱-۴. مدل‌سازی به روش تحلیلی و به دست آوردن ضرایب نفوذ	۴۸
۴۹-۴	۱-۱-۴. انتقال جرم در تیغه‌ی تکی داخل حجم زیادی از حلال	۴۹
۵۱-۴	۲-۱-۴. انتقال جرم در تعداد زیادی نمونه داخل حجم محدودی از حلال	۵۱

۵۴.....	۳-۱-۴. محاسبه‌ی ضرایب نفوذ مؤثر
۵۵.....	۲-۴. مدل دوپارامتری آزورا
۵۷.....	۳-۴. مدل‌سازی بر اساس تقریب چندجمله‌ای
۵۸.....	۱-۳-۴. تقریب چندجمله‌ای سهموی
۵۹.....	۲-۳-۴. مدل‌سازی بر اساس تقریب چندجمله‌ای توانی
۶۴.....	۴-۴. اعتبارسنجی مدل‌های پیشنهادی و برآورد خطا

## ۶۵

### فصل پنجم : مواد و روش‌ها

۶۶.....	۱-۵. آماده کردن نمونه‌ها
۶۷.....	۲-۵. انجام آزمایش
۶۷.....	۱-۲-۵. آزمایش استخراج نشاسته از سیب‌زمینی در حالت تیغه‌ی تکی
۶۸.....	۲-۲-۵. آنالیز و اندازه‌گیری در حالت ماده‌ی تک
۷۲.....	۳-۲-۵. آزمایش استخراج نشاسته از سیب‌زمینی در حالت توده‌ی تیغه‌ها
۷۳.....	۴-۲-۵. آنالیز و اندازه‌گیری در آزمایش‌ها روی توده‌ی مواد
۷۳.....	۳-۵. به دست آوردن غلظت‌های تعادلی

## ۷۴

### فصل ششم : ارائه‌ی نتایج، بحث و پیشنهادها

۷۵.....	۱-۶. نتایج حاصل از آزمایش‌های استخراج نشاسته از تیغه‌ی تکی سیب‌زمینی
۷۵.....	۱-۱-۶. تعیین غلظت‌های تعادلی
۷۸.....	۲-۱-۶. به دست آوردن ضرایب نفوذ آب، پروتئین و نشاسته و نتایج مدل‌سازی به روش دقیق تحلیلی
۸۰.....	۳-۱-۶. توزیع غلظت درون تیغه‌ی سیب‌زمینی
۸۴.....	۴-۱-۶. نتایج مدل‌سازی به روش آزورا
۸۷.....	۵-۱-۶. مقایسه‌ی نمودارهای پیش‌بینی غلظت توسط مدل دقیق تحلیلی و مدل آزورا
۹۰.....	۶-۱-۶. نتایج حاصل از مدل‌سازی بر اساس تقریب چندجمله‌ای سهموی
۹۲.....	۷-۱-۶. نتایج حاصل از مدل‌سازی به روش تقریب چندجمله‌ای توانی
۹۵.....	۸-۱-۶. مقایسه‌ی آماری بین نتایج مدل‌های تقریبی سهموی و توانی
۹۶.....	۹-۱-۶. نتایج حاصل از ساده‌سازی مدل چندجمله‌ای توانی
۹۸.....	۲-۶. نتایج حاصل از آزمایش‌های استخراج نشاسته از توده‌ی تیغه‌های سیب‌زمینی
۹۸.....	۱-۲-۶. تعیین غلظت‌های تعادلی
۱۰۲.....	۲-۲-۶. به دست آوردن ضرایب نفوذ آب، پروتئین و نشاسته و نتایج مدل‌سازی به روش دقیق تحلیلی
۱۰۲.....	۳-۲-۶. در نظر گرفتن ضریب تفکیک برابر با یک ( $K=1$ )
۱۰۵.....	۴-۲-۶. مخالف یک فرض کردن ضریب تفکیک ( $K \neq 1$ )
۱۰۸.....	۵-۲-۶. نتایج مدل‌سازی به روش آزورا در استخراج از توده‌ی مواد
۱۱۱.....	۶-۲-۶. مقایسه‌ی نموداری بین نتایج به دست آمده از مدل تحلیلی
۱۱۵.....	۳-۶. نتیجه‌گیری و جمع بندی

## ۱۱۹

### منابع و مراجع

## فهرست جدول‌ها

عنوان

صفحه

جدول ۱-۲. درصد ترکیبات سیب‌زمینی.....	۲۳
جدول ۲-۲. میزان کارایی نشاسته‌ی تولید شده از منابع مختلف در برخی از کاربردها.....	۲۸
جدول ۱-۶. مقادیر تعادلی جذب رطوبت و کاهش جامد به دست آمده از طریق آزمایش (g/100g)، در حالت ماده‌ی تک.....	۷۷
جدول ۲-۶. مقادیر تعادلی جذب رطوبت و کاهش جامد به دست آمده از روش آزورا در دماهای مختلف بر حسب g/100g به همراه درصد خطا نسبت به مقدار تجربی.....	۷۸
جدول ۳-۶. ضرایب نفوذ مؤثر پروتئین، نشاسته و آب و اعتبارسنجی مدل تحلیلی در فرایند لیچینگ در دماهای مختلف، حالت ماده‌ی تک.....	۸۰
جدول ۴-۶. مقادیر $R^2$ ، MRE و RMSE برای نتایج مدل آزورا، در حالت ماده‌ی تک.....	۸۷
جدول ۵-۶. مقایسه‌ی آماری مدل‌های توانی و سهموی «نسبت به داده‌های تجربی».....	۹۵
جدول ۶-۶. مقایسه‌ی آماری مدل‌های توانی و سهموی «نسبت به مدل تحلیلی».....	۹۶
جدول ۷-۶. مقادیر تعادلی جذب رطوبت و کاهش جامد به دست آمده از طریق آزمایش (g/100g)، در استخراج از انبوه مواد.....	۹۹
جدول ۸-۶. مقادیر غلظت‌های تعادلی به دست آمده از روش آزورا در دماهای مختلف، در حالت استخراج از انبوه مواد بر حسب g/100g، به همراه درصد خطا نسبت به مقدار تجربی.....	۱۰۱
جدول ۹-۶. ضرایب نفوذ مؤثر پروتئین، نشاسته و آب در فرایند لیچینگ در دماهای مختلف و اعتبارسنجی مدل تحلیلی، در استخراج از انبوه مواد، $K=1$ .....	۱۰۳
جدول ۱۰-۶. ضرایب نفوذ مؤثر پروتئین، نشاسته و آب در دماهای مختلف و اعتبارسنجی مدل تحلیلی، در استخراج از انبوه مواد، $K \neq 1$ .....	۱۰۶
جدول ۱۱-۶. اعتبارسنجی مدل آزورا در تخمین غلظت‌های بی‌بعد مواد در استخراج از انبوه مواد.....	۱۱۱

## فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

- شکل ۱-۲. استخراج کننده‌ی بستر ثابت [۴۰]..... ۱۵
- شکل ۲-۲. لیچینگ در بستر متحرک توسط استخراج کننده‌ی بولمن [۴۱]..... ۱۷
- شکل ۳-۲. لیچینگ در بستر متحرک توسط استخراج کننده‌ی هیلدربرانت [۴۱]..... ۱۷
- شکل ۴-۲. سیستم لیچینگ به صورت ناهمسو [۴۱]..... ۱۸
- شکل ۵-۲. سیستم مرسوم استخراج با حلال [۴]..... ۱۹
- شکل ۶-۲. سیستم استخراج به کمک مایکروویو (MAE) [۴]..... ۲۰
- شکل ۷-۲. سیستم استخراج به کمک امواج فراصوت (UAE) [۴]..... ۲۱
- شکل ۸-۲. استخراج به کمک الکتروسیته الف (HVED و ب) PEF [۴]..... ۲۲
- شکل ۹-۲. نشاسته ذخیره شده داخل سلول‌ها [۱۶]..... ۲۴
- شکل ۱۰-۲. تصویر SEM از گرانول‌های خام نشاسته در الف) برنج ب) کاساوا و ج) سیب‌زمینی [۴۹]..... ۲۵
- شکل ۱۱-۲. الف) گرانول‌های نشاسته در زیر میکروسکوپ و ب) نگاهی به برش سطح مقطع گرانول [۴۹]..... ۲۵
- شکل ۱۲-۲. آسیاب مورد استفاده برای خرد کردن سیب‌زمینی [۱۶]..... ۳۰
- شکل ۱۳-۲. دکانتور سانتریفیوژی پیوسته [۱۶]..... ۳۱
- شکل ۱۴-۲. الک سانتریفیوژی مخروطی [۱۶]..... ۳۲
- شکل ۱۵-۲. سانتریفیوژ پیوسته‌ی دیسکی [۱۶]..... ۳۲
- شکل ۱۶-۲. الف) یک سیستم ۹ مرحله‌ای تصفیه‌ی نشاسته به صورت ناهمسو و ب) یک هیدروسیکلون تکی [۱۶]..... ۳۳
- شکل ۱۷-۲. محفظه‌ی فیلتر تحت خلأ [۱۶]..... ۳۴
- شکل ۱۸-۲. نمای شماتیک یک خشک‌کن بادی نشاسته [۱۶]..... ۳۵
- شکل ۴-۱. تغییرات  $n(\tau)$  بر حسب  $\tau$ ..... ۶۱
- شکل ۴-۲. رفتار نمودار  $n(\tau)$  نسبت به تغییرات  $\frac{\bar{\phi}}{1-\bar{\phi}}$ ..... ۶۲
- شکل ۵-۱. نمونه‌های تیغه‌ای سیب‌زمینی..... ۶۶
- شکل ۵-۲. نمای شماتیک دستگاه شیکر انکوباتور با قابلیت تنظیم دما و دور همزن..... ۶۷
- شکل ۵-۳. تیغه‌های تکی سیب‌زمینی داخل شیکر انکوباتور..... ۶۸
- شکل ۵-۴. تیغه‌های سیب‌زمینی در حال خشک شدن داخل آون به منظور تعیین میزان رطوبت و ماده‌ی خشک..... ۶۹
- شکل ۵-۵. منحنی استاندارد تعیین غلظت پروتئین بر حسب شدت جذب در ۵۴۰ nm..... ۷۰
- شکل ۵-۶. دستگاه اسپکتروفوتومتر مورد استفاده جهت اندازه‌گیری شدت جذب نور محلول..... ۷۱
- شکل ۵-۷. نشاسته‌ی استخراج شده..... ۷۲
- شکل ۵-۸. استخراج نشاسته از توده‌ی تیغه‌های سیب‌زمینی در دمای ۵۵ درجه‌ی سانتی‌گراد..... ۷۲
- شکل ۶-۱. برازش خط از میان داده‌های t/SL بر حسب زمان برای نشاسته..... ۷۶
- شکل ۶-۲. برازش خط از میان داده‌های t/PL بر حسب زمان برای پروتئین..... ۷۶



- شکل ۶-۳. برازش خط از میان داده‌های  $t/WG$  بر حسب زمان برای آب ..... ۷۷
- شکل ۶-۴. مقایسه‌ی میان نتایج به دست آمده از روش دقیق تحلیلی و داده‌های تجربی ..... ۷۹
- شکل ۶-۵. توزیع غلظت نشاسته در درون تیغهی سیب‌زمینی در دمای  $30^{\circ}C$  ..... ۸۱
- شکل ۶-۶. توزیع غلظت نشاسته در درون تیغهی سیب‌زمینی در دمای  $55^{\circ}C$  ..... ۸۱
- شکل ۶-۷. توزیع غلظت پروتئین در درون تیغهی سیب‌زمینی در دمای  $30^{\circ}C$  ..... ۸۲
- شکل ۶-۸. توزیع غلظت پروتئین در درون تیغهی سیب‌زمینی در دمای  $55^{\circ}C$  ..... ۸۲
- شکل ۶-۹. توزیع غلظت رطوبت در درون تیغهی سیب‌زمینی در دمای  $30^{\circ}C$  ..... ۸۳
- شکل ۶-۱۰. توزیع غلظت رطوبت در درون تیغهی سیب‌زمینی در دمای  $55^{\circ}C$  ..... ۸۳
- شکل ۶-۱۱. نمودار تغییرات کاهش نشاسته در تیغهی سیب‌زمینی بر حسب زمان در دماهای مختلف ..... ۸۵
- شکل ۶-۱۲. نمودار تغییرات کاهش پروتئین در تیغهی سیب‌زمینی بر حسب زمان در دماهای مختلف ..... ۸۵
- شکل ۶-۱۳. نمودار تغییرات جذب آب در تیغهی سیب‌زمینی بر حسب زمان در دماهای مختلف ..... ۸۶
- شکل ۶-۱۴. مقایسه‌ی غلظت‌های بی‌بعد پیش‌بینی شده توسط مدل دوپارامتری آژورا نسبت به داده‌های تجربی برای همه‌ی مواد در تمامی دماها ..... ۸۶
- شکل ۶-۱۵. مقایسه‌ی بین غلظت‌های بی‌بعد نشاسته درون تیغهی سیب‌زمینی پیش‌بینی شده توسط مدل دوپارامتری و مدل تحلیلی و نتایج تجربی ..... ۸۸
- شکل ۶-۱۶. مقایسه‌ی بین غلظت‌های بی‌بعد پروتئین درون تیغهی سیب‌زمینی پیش‌بینی شده توسط مدل دوپارامتری و مدل تحلیلی و نتایج تجربی ..... ۸۹
- شکل ۶-۱۷. مقایسه‌ی بین غلظت‌های بی‌بعد رطوبت درون تیغهی سیب‌زمینی پیش‌بینی شده توسط مدل دوپارامتری و مدل تحلیلی و نتایج تجربی ..... ۸۹
- شکل ۶-۱۸. تغییرات غلظت بی‌بعد نشاسته بر حسب زمان، پیش‌بینی شده توسط مدل سهموی و تحلیلی ..... ۹۰
- شکل ۶-۱۹. تغییرات غلظت بی‌بعد پروتئین بر حسب زمان، پیش‌بینی شده توسط مدل سهموی و تحلیلی ..... ۹۱
- شکل ۶-۲۰. تغییرات غلظت بی‌بعد رطوبت بر حسب زمان، پیش‌بینی شده توسط مدل سهموی و تحلیلی ..... ۹۱
- شکل ۶-۲۱. مقایسه‌ی غلظت‌های بی‌بعد نشاسته، پروتئین و رطوبت، تخمین زده شده توسط مدل سهموی نسبت به داده‌های تجربی، در دماهای مختلف ..... ۹۲
- شکل ۶-۲۲. تغییرات غلظت بی‌بعد حین حذف نشاسته، پیش‌بینی شده توسط مدل سهموی، توانی و تحلیلی به همراه نقاط تجربی ..... ۹۳
- شکل ۶-۲۳. تغییرات غلظت بی‌بعد حین حذف پروتئین، پیش‌بینی شده توسط مدل سهموی، توانی و تحلیلی به همراه نقاط تجربی ..... ۹۳
- شکل ۶-۲۴. تغییرات غلظت بی‌بعد حین جذب آب، پیش‌بینی شده توسط مدل سهموی، توانی و تحلیلی به همراه نقاط تجربی ..... ۹۴
- شکل ۶-۲۵. مقایسه‌ی غلظت‌های بی‌بعد نشاسته، پروتئین و رطوبت، تخمین زده شده توسط مدل توانی نسبت به داده‌های تجربی، در دماهای مختلف ..... ۹۴
- شکل ۶-۲۶. تغییرات غلظت بی‌بعد نشاسته، تخمین زده شده توسط مدل‌های ساده شده‌ی تحلیلی و تقریب توانی، در مقایسه با مدل کلی تحلیلی و داده‌های تجربی ..... ۹۷
- شکل ۶-۲۷. تغییرات غلظت بی‌بعد پروتئین، تخمین زده شده توسط مدل‌های ساده شده‌ی تحلیلی و تقریب توانی، در مقایسه با مدل کلی تحلیلی و داده‌های تجربی ..... ۹۷

- شکل ۶- ۲۸. تغییرات غلظت بی بعد آب، تخمین زده شده توسط مدل های ساده شده ی تحلیلی و تقریب توانی، در مقایسه با مدل کلی تحلیلی و داده های تجربی. ۹۸.....
- شکل ۶- ۲۹. رسم  $t/SL$  بر حسب زمان برای نشاسته در استخراج از انبوه مواد و برازش خط. ۹۹.....
- شکل ۶- ۳۰. رسم  $t/PL$  بر حسب زمان برای پروتئین در استخراج از انبوه مواد و برازش خط. ۱۰۰.....
- شکل ۶- ۳۱. رسم  $t/WG$  بر حسب زمان برای آب در استخراج از انبوه مواد و برازش خط. ۱۰۰.....
- شکل ۶- ۳۲. تغییرات غلظت بی بعد نشاسته، تخمین زده شده توسط مدل تحلیلی در استخراج از انبوه مواد،  $K=1$  بر حسب زمان بی بعد. ۱۰۳.....
- شکل ۶- ۳۳. تغییرات غلظت بی بعد پروتئین، تخمین زده شده توسط مدل تحلیلی در استخراج از انبوه مواد،  $K=1$  بر حسب زمان بی بعد. ۱۰۴.....
- شکل ۶- ۳۴. تغییرات غلظت بی بعد رطوبت، تخمین زده شده توسط مدل تحلیلی در استخراج از انبوه مواد،  $K=1$  بر حسب زمان بی بعد. ۱۰۴.....
- شکل ۶- ۳۵. مقایسه ی نتایج مدل تحلیلی کرانک، حالت  $K=1$  نسبت به داده های تجربی. ۱۰۵.....
- شکل ۶- ۳۶. تغییرات غلظت بی بعد نشاسته، تخمین زده شده توسط مدل تحلیلی در استخراج از انبوه مواد،  $K \neq 1$  بر حسب زمان بی بعد. ۱۰۶.....
- شکل ۶- ۳۷. تغییرات غلظت بی بعد پروتئین، تخمین زده شده توسط مدل تحلیلی در استخراج از انبوه مواد،  $K \neq 1$  بر حسب زمان بی بعد. ۱۰۷.....
- شکل ۶- ۳۸. تغییرات غلظت بی بعد رطوبت، تخمین زده شده توسط مدل تحلیلی در استخراج از انبوه مواد،  $K \neq 1$  بر حسب زمان بی بعد. ۱۰۷.....
- شکل ۶- ۳۹. پیش بینی مدل تحلیلی کرانک، حالت  $K \neq 1$  نسبت به داده های تجربی. ۱۰۸.....
- شکل ۶- ۴۰. تغییرات کاهش نشاسته، بر حسب زمان در حین استخراج از انبوه تیغه های سیب زمینی. ۱۰۸.....
- شکل ۶- ۴۱. تغییرات کاهش پروتئین، بر حسب زمان در حین استخراج از انبوه تیغه های سیب زمینی. ۱۰۹.....
- شکل ۶- ۴۲. تغییرات جذب رطوبت، بر حسب زمان در حین استخراج از انبوه تیغه های سیب زمینی. ۱۰۹.....
- شکل ۶- ۴۳. مقایسه ی پیش بینی مدل آزورا از غلظت های بی بعد مواد با داده های تجربی. ۱۱۰.....
- شکل ۶- ۴۴. مقایسه ی نتایج مدل تحلیلی و آزورا برای نشاسته در استخراج از انبوه مواد،  $K=1$ . ۱۱۲.....
- شکل ۶- ۴۵. مقایسه ی نتایج مدل تحلیلی و آزورا برای پروتئین در استخراج از انبوه مواد،  $K=1$ . ۱۱۲.....
- شکل ۶- ۴۶. مقایسه ی نتایج مدل تحلیلی و آزورا برای رطوبت در استخراج از انبوه مواد،  $K=1$ . ۱۱۳.....
- شکل ۶- ۴۷. مقایسه ی نتایج مدل تحلیلی و آزورا برای نشاسته در استخراج از انبوه مواد،  $K \neq 1$ ، دمای  $55^{\circ}C$ . ۱۱۳.....
- شکل ۶- ۴۸. مقایسه ی نتایج مدل تحلیلی و آزورا برای پروتئین در استخراج از انبوه مواد،  $K \neq 1$ ، دمای  $55^{\circ}C$ . ۱۱۴.....
- شکل ۶- ۴۹. مقایسه ی نتایج مدل تحلیلی و آزورا برای رطوبت در استخراج از انبوه مواد،  $K \neq 1$ ، دمای  $55^{\circ}C$ . ۱۱۴.....

## فهرست علائم اختصاری

a	نصف ارتفاع حلال (m)
A	سطح تیغه ( $m^2$ )
$a_n(\tau)$	ضرایب جملات تقریب چند جمله‌ای در معادلات (۴-۴۱) و (۴-۵۲)
$B_i$	عدد بایوت
C	غلظت جزء در جامد (نمونه‌ی تازه g/100g)
De	ضریب نفوذ مؤثر ( $m^2/s$ )
K	ضریب تفکیک
l	نصف ضخامت تیغه در نمونه (m)
m	جرم نمونه (g)
M	درصد جزء خارج شده از یا جذب شده به نمونه‌ی جامد (نمونه‌ی تازه g/100g)
$n(\tau)$	توان جملات تقریب چند جمله‌ای در معادله‌ی (۴-۵۲)
P	پارامتر مربوط به معادله‌ی (۴-۳۳)
PL	درصد کاهش پروتئین (نمونه‌ی تازه g/100g)
$q_n$	پارامتر مربوط به معادله‌ی (۴-۲۲)
S	جرم ماده‌ی خشک (g)
$S_1$	ثابت مدل دوپارامتری مربوط به سرعت کاهش جامد ( $h^{-1}$ )
$S_2$	ثابت مدل دوپارامتری مربوط به سرعت جذب رطوبت ( $h^{-1}$ )
SL	درصد کاهش جامد یا نشاسته (نمونه تازه g/100g)
SS	درصدی از حل‌شونده تعادلی که در لحظه‌ی t در جامد حضور دارد (نمونه‌ی تازه g/100g)
t	زمان (S)
V	حجم نمونه ( $m^3$ )
WG	درصد جذب رطوبت (نمونه تازه g/100g)
x	فاصله از مرکز نمونه (m)
X	مختصات بی‌بعد

## فهرست علائم یونانی

$\varphi$	غلظت بی‌بعد
$\tau$	زمان بی‌بعد ( $D_e t/l^2$ )
$\alpha$	پارامتر معادله‌ی (۴-۲۲)

## فهرست زیروندها و بالوندها

---

اولیه	0
تعادلی	e
در زمان t	t
پس از زمان بی نهایت	$\infty$
حل شونده یا جامد	s
رطوبت (آب)	w
مایع (حلال)	L
پروتئین	P
تجربی	Exp
پیش‌بینی شده توسط مدل	Predict

بررسی تجربی و مدل سازی ریاضی فرآیند استخراج نشاسته از سیب زمینی

ریحانه حسن زاده

استخراج اجزا با حلال از منابع زیستی، کاربردهای فراوانی در صنایع غذایی، دارویی و غیره دارد. مطالعه انتقال جرمی که در این فرایندها رخ می دهد از جهت طراحی های مهندسی حائز اهمیت است. در پژوهش حاضر، انتقال جرم در نفوذ نشاسته، پروتئین و رطوبت حین فرایند لیچینگ نشاسته از سیب زمینی مورد مطالعه قرار گرفته است. آزمایش ها با غوطه وری نمونه های سیب زمینی در آب مقطر به عنوان حلال در سه دمای ۳۰، ۴۵ و ۵۵ °C انجام گرفت و مقدار کاهش نشاسته و پروتئین و همچنین میزان جذب رطوبت در بازه های زمانی مختلف بین صفر تا نهایتاً پنج ساعت، با روش های افزودن معرف، رنگ سنجی و وزن سنجی اندازه گیری شد. به منظور بررسی بهتر فرایند، آزمایش ها به دو صورت انجام گرفت: بار اول تیغه ها به صورت تکی در حجم زیادی از آب قرار گرفتند و مرتبه ای دوم تعداد زیادی نمونه در حجم محدودی آب نسبت به نمونه ها، غوطه ور شدند. در هر مورد مدل های ریاضی متفاوتی برای پیش بینی سینتیک انتقال جرم حل شونده و رطوبت پیشنهاد شد. در هر یک، ابتدا ضرایب نفوذ با برازش حل تحلیلی قانون دوم نفوذ فیک به دست آمدند. سپس یک مدل دو پارامتری دیگر بر اساس مدل ایجاد شده توسط آزورا، به کار گرفته شد. در انتها دو مدل تقریبی چند جمله ای سهمی گون و توانی برای پیش بینی تغییرات غلظت متوسط مواد در فرایند لیچینگ از ماده تک به کار گرفته شدند. نتایج تمامی مدل ها توسط مقایسه ی گرافیکی و آماری با داده های تجربی اعتبار سنجی شدند.

نتایج نشان داد که تمامی مدل ها موافقت خوبی با داده های آزمایشگاهی دارند. مدل های تقریبی سهمی گون و دو پارامتری از ساده ترین روابط برخوردار هستند و با دقت قابل قبولی می توان از آن ها در فرایندهای نفوذ در جامدات غوطه ور در سیال استفاده نمود. مدل تقریبی توانی از بالاترین دقت نسبت به حل تحلیلی برخوردار است، ولی شکل پیچیده ای برای استفاده دارد که با توجه به این مسئله ساده سازی هایی محدود به زمان های ابتدایی و یا انتهایی فرایند نیز انجام گرفت. همچنین نشان داده شد که ضرایب نفوذ و مقادیر تعادلی جامد استخراج شده و رطوبت جذب شده در لیچینگ از انبوه تیغه ها دارای مقادیر کمتری نسبت به حالت ماده تک هستند که این امر به خاطر پایین آمدن پتانسیل شیمیایی انتقال جرم در این حالت می باشد.

کلیدواژه: مدل ریاضی، استخراج، انتقال جرم، سیب زمینی، نشاسته

# فصل اول:

## مقدمه

لیچینگ<sup>۱</sup> (استخراج با حلال) به فرایند انتقال یک جزء از ماده جامد با استفاده از یک حلال مایع اطلاق می‌شود. این فرایند، روشی معمول برای استخراج مواد معدنی، آلی، زیستی و ... در انواع عملیات مهندسی شیمی و صنایع غذایی است. از موارد کاربرد این روش می‌توان به استخراج مس و طلا از سنگ‌های معدنشان توسط محلول‌های اسید سولفوریک و سدیم سیانید، استخراج قند از چغندر قند با آب داغ، استخراج روغن از دانه‌های روغنی با حلال‌های آلی همچون هگزان، استن یا اتر [۱] و همچنین استخراج حل‌شونده‌ها از مواد غذایی با غوطه‌ورسازی در آب اشاره نمود [۲]. در حال حاضر در صنایع غذایی تکنیک استخراج با حلال در سیستم‌های بسته<sup>۲</sup>، روشی معمول برای به دست آوردن اجزای سودمند از گیاهان مختلف و ضایعات آن‌ها محسوب می‌شود. در روش مرسوم استخراج با حلال، نمونه‌ی جامد در حلال فرو برده و پس از برقراری شرایط تعادل و انتقال اجزا، عصاره‌ی به دست آمده جمع‌آوری می‌شود [۳].

دیواره‌ی سلولی در مواد زیستی مثل یک غشای نیمه‌تراوا عمل می‌کند. وقتی که گیاهان در معرض یک محلول قرار می‌گیرند، جریان‌های غیرهمسویی از اجزای متعدد حل‌شونده و همچنین رطوبت به داخل و خارج از بافت آن‌ها به طور همزمان به وجود می‌آید [۴]. غوطه‌ورسازی سبزیجات خام در حلال به منظور جذب برخی از اجزا به داخل بافت آن و یا خارج کردن آن‌ها، چه به عنوان یک فرایند کامل و چه به عنوان یک پیش‌عملیات قبل از عملیات اصلی، کاربردهای وسیعی در صنعت دارد. این فرایند به غیر از جداسازی و بازیابی اجزای موردنظر به دلایل متعدد دیگری نیز انجام می‌پذیرد از جمله: نرم شدن و کاهش زمان پخت ماده از طریق جذب آب [۵]، خارج کردن مقداری از آب ماده و بهبود طعم و کیفیت محصولات نهایی کنسروی، خشک شده، فریز شده و ... از طریق تزریق برخی مواد طعم دهنده (همانند آن‌چه که در آب‌زدایی اسمزی<sup>۳</sup> انجام می‌شود [۶]) و همچنین خارج کردن قندهای کاهنده و در نتیجه غیرفعال کردن آنزیم‌های مخرب در ماده (آنزیم‌زدایی<sup>۴</sup> در آب داغ [۷, ۸]). به علاوه، غوطه‌ور کردن سبزیجات خام در آب داغ، قبل از عملیات خشک کردن، موجب کاهش زمان خشک کردن و افزایش سرعت خارج کردن رطوبت خواهد شد [۹, ۱۰]. این فرایند همچنین بافت (استحکام و تردی)، رنگ، مزه و

<sup>1</sup> Leaching

<sup>2</sup> Batch

<sup>3</sup> Osmotic Dehydration

<sup>4</sup> Blanching

ساختار مواد غذایی خشک شده و یا سرخ شده را بهبود داده و جذب روغن در سیب‌زمینی‌های سرخ کرده را به علت ژلاتینه شدن نشاسته کاهش می‌دهد [۸، ۱۱-۱۳]. انتقال حل‌شونده و رطوبت هر دو تحت تأثیر پارامترهای عملیاتی همچون، دما، زمان تماس و خصوصیات ماتریس ماده سلول‌دار قرار می‌گیرند [۳، ۴، ۱۴].

سیب‌زمینی به عنوان چهارمین منبع مهم تولید غذای گیاهی بعد از گندم، برنج و ذرت یکی از مواد غذایی مورد استفاده در صنعت است [۱۵] که اجزای تشکیل‌دهنده آن بالاخص نشاسته و پروتئین با قرار گرفتن در آب قابلیت نفوذ و خارج شدن از نمونه را به درون آب دارند [۷]. ۶۳ تا ۸۷ درصد سیب‌زمینی را آب، ۱۳ تا ۳۰ درصد آن را کربوهیدرات، ۰/۷ تا ۴/۶ درصد پروتئین، ۰/۰۲ تا ۰/۹۶ لیپیدها و حدود ۰/۴۴ از آن را خاکستر تشکیل می‌دهد [۷]. اساساً ترکیبات شیمیایی ماده‌ی خشک سیب‌زمینی از نمونه‌ای به نمونه دیگر، بسته به نوع آن، شرایط رشد و درجه‌ی رسیدگی آن تغییر می‌کند؛ اما بیشترین حجم ماده‌ی خشک (حدود ۷۷ درصد) در سیب‌زمینی از نشاسته تشکیل شده است [۱۶]. سیب‌زمینی در بسیاری از کاربردها تحت پیش‌عملیات بلانچینگ قرار می‌گیرد [۱۲]. همچنین نشاسته‌ی آن به علت خصوصیات منحصر به فردی که دارد، استخراج شده و کاربرد بسیاری در صنایع مختلف دارد [۱۷].

پدیده‌ی نفوذ یک فرآیند فیزیکی شامل انتقال جرم است. جذب یا حذف املاح از مواد جامد تا حدودی از طریق نفوذ کنترل و یکی از اجزای مهم در عملیات واحد محسوب می‌گردد. دانستن در مورد انتقال جرمی که در فرایند ذکر شده رخ می‌دهد از نقطه‌نظر طراحی‌های مهندسی و جنبه‌های صنعتی مسئله‌ای مهم و ضروری به شمار می‌رود. اهمیت این موضوع هم به لحاظ کاربردهای فراوان فرایند بلانچینگ مواد غذایی و هم به دلیل اهمیت فرایند استخراج با حلال در صنعت روشن است. چرا که گاهی بسته به نوع فرایند، نرخ نفوذ بالاتر و یا پایین‌تر مطلوب است. انتقال جرم در فرایند استخراج با حلال را می‌توان با استفاده از روابط ریاضی شبیه‌سازی نمود و تأثیر پارامترهای متعدد از جمله دما، زمان، هندسه و نوع ماده را بر سرعت انجام فرایند، تعیین نمود. بررسی‌های تجربی و تئوری زیادی در مورد جذب رطوبت در مواد غذایی [۱۵، ۱۸، ۱۹] و همچنین استخراج حل‌شونده‌ها از منابع طبیعی انجام شده است [۸، ۲۰-۲۵]. در بیشتر تحقیقات انجام شده معادلات دیفرانسیلی بر اساس قانون دوم نفوذ فیک<sup>۱</sup> به دست آمده و حل این معادلات به روش‌های تحلیلی<sup>۲</sup> و یا عددی<sup>۳</sup> انجام شده است.

<sup>۱</sup> Fick's second law of diffusion

<sup>۲</sup> Analytical

<sup>۳</sup> Numerical



روش‌های تحلیلی از جمله روش‌های پیچیده و زمان‌بر در مدل‌سازی عمیقات فنی و مهندسی به شمار می‌روند. گاهی در بعضی از سیستم‌ها معادلات حاکم بر مسئله به گونه‌ای است که نمی‌توان با استفاده از راه‌های موجود آن‌ها را حل نمود. به علاوه در بسیاری از موارد حتی با وجود امکان استفاده از روش‌های تحلیلی به علت پیچیدگی ترجیح داده می‌شود تا از روش‌های ساده‌تر با ایجاد میزان قابل قبولی از خطا، بهره گرفته شود [۲۶]. در این پژوهش علاوه بر روش‌های تحلیلی برای حل مسئله، سعی شد تا روابط ساده‌تری نیز برای پیش‌بینی غلظت نشاسته، پروتئین و رطوبت نمونه‌های سیب‌زمینی حین فرایند به دست آید. ابتدا حالت ساده‌تری از فرایند یعنی استخراج اجزا از نمونه‌ی تکی<sup>۱</sup> در نظر گرفته شد و مدل‌های مربوطه با توجه به شرایط اولیه و مرزی استنتاج شدند و سپس حالت پرکاربردتر فرایند یعنی استخراج از انبوه نمونه‌ها<sup>۲</sup> مورد مطالعه قرار داده شد. این مدل‌ها پس از مدل‌های تحلیلی، مدل دوپارامتری آزورا، مدل‌های لامپ<sup>۳</sup> بر اساس تقریب چندجمله‌ای<sup>۴</sup> سهمی‌گون<sup>۵</sup> و بر اساس تقریب چندجمله‌ای توانی<sup>۶</sup> هستند.

آزورا<sup>۷</sup> و همکارانش در سال ۱۹۹۲ مدل دوپارامتری ساده‌ای بر اساس معادله‌ی موازنه‌ی جرم برای مدل‌سازی انتقال جرم در فرایند آب‌زدایی اسمزی (OD)<sup>۸</sup> و تخمین میزان تعادلی جذب ماده‌ی جامد و حذف رطوبت پیشنهاد کردند [۲۷]. آب‌زدایی اسمزی (OD) فرایندی برای حذف آب است و در طی آن تکه‌های میوه یا سبزیجات تازه در معرض محلولی با فشار اسمزی<sup>۹</sup> بالاتر و - در نتیجه فعالیت آب کمتری - قرار می‌گیرد. برای میوه‌جات محلول‌های قندی با افزودن مقدار کمی نمک و یا بدون افزودن آن و برای سبزیجات محلول‌های نمکی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۸]. در طی این فرایند تحت تأثیر فشارهای اسمزی متفاوت، آب از داخل ماده غذایی به درون محلول و حل‌شونده در جهت مخالف به درون نمونه نفوذ می‌کند. مدل دوپارامتری آزورا قادر است تا سینتیک فرایند آب‌زدایی اسمزی و نقطه برقراری تعادل را با استفاده از داده‌های به‌دست آمده از دوره کوتاهی از فرایند پیش‌بینی نماید. از آنجا که مکانیزم انتقال جرم در فرایند آب‌زدایی اسمزی و لیچینگ مشابه یکدیگرند، انتظار می‌رفت تا این مدل قادر به پیش‌بینی سینتیک انتقال جرم در فرایند لیچینگ نیز باشد. در این تحقیق،

<sup>1</sup> Single body

<sup>2</sup> Bulk samples

<sup>3</sup> Lumped

<sup>4</sup> Polynomial approximation

<sup>5</sup> Parabolic

<sup>6</sup> Power law

<sup>7</sup> Azuara

<sup>8</sup> Osmotic Dehydration

<sup>9</sup> Osmotic pressure

تیغه‌های بسیار نازک شده سیب‌زمینی در آب خالص غوطه‌ور شدند و جریان‌های ناهم‌سوی نفوذ حل‌شونده‌ها از داخل نمونه به حلال و نفوذ رطوبت از حلال به درون نمونه‌ها برقرار شد. در واقع در هر دو فرایند، آب و حل‌شونده‌ها در حال نفوذ به درون یا به خارج از جامد هستند، منتهی در جهت‌های عکس یکدیگر. این پدیده‌ها به علت اختلاف بین پتانسیل‌های شیمیایی آب و حل‌شونده‌ها در جامد و محلول رخ می‌دهد. در این پژوهش نیز مدل ریاضی دوپارامتری آزورا برای تخمین مقادیر تعادلی کاهش جامد و جذب رطوبت در سیب‌زمینی در دماهای مختلف و در نتیجه مدل‌سازی سینتیک فرایند لیچینگ اصلاح شد و بنابراین از امکان استفاده‌ی این مدل در فرایند استخراج اطمینان حاصل شد.

مدل‌های ریاضی لامپ برای اولین بار در مسائل انتقال حرارت هدایتی ناپایا<sup>۱</sup> مطرح شدند و به خاطر سادگی به طور گسترده‌ای در این زمینه مورد استفاده قرار گرفتند. مدل‌های لامپ کلاسیک توزیع دمای یکنواختی در داخل جسم در نظر می‌گیرند. این فرض محدود به زمانی است که جسم بسیار کوچک باشد، یا رسانایی گرمایی<sup>۲</sup> زیادی داشته باشد و یا در معرض سیالی با ضریب جابه‌جایی<sup>۳</sup> گرمایی کوچک قرار داشته باشد. تمام این فرضیات برابر آن است که عدد بایوت<sup>۴</sup>  $(Bi=hL/K)$  در مسئله مقداری کوچک داشته باشد (کمتر از ۰/۱) [۲۹]. از آنجا که دامنه‌ی وسیعی از مسائل مهندسی با اعداد بایوت بالاتر سر و کار دارند و در عین حال نیاز به مدل‌های پیش‌بینی‌کننده‌ی مقداری متوسط از متغیر در کل جسم احساس می‌شود، تلاش‌های زیادی برای بهبود مدل‌های لامپ صورت گرفت. با استفاده از روش‌های تقریب هرmit و چندجمله‌ای، مدل‌های لامپ بهبود یافته برای اعداد بایوت بالاتر در مسائل شکل گرفتند [۳۰، ۳۱]. تحقیقاتی نیز بر روی استفاده از مدل‌های لامپ بهبود یافته در مسائل انتقال جرم ناپایا انجام شده‌اند [۳۲-۳۸]؛ اما تا کنون مطالعه‌ای بر روی کاربرد این روش‌ها بر روی فرایند استخراج با حلال صورت پذیرفته‌است. در تحقیق حاضر مدل‌سازی انتقال جرم در این فرایند و تخمین تغییرات غلظت نشاسته، پروتئین و رطوبت در نمونه‌ها بر اساس دو مدل لامپ تقریبی انجام گرفت. اولین تقریب بر اساس یک پروفایل چندجمله‌ای سهموی در یک مسیر مکانی پیشنهاد شده توسط رایس و دو<sup>۵</sup> [۲۶] و دومی یک عبارت

<sup>1</sup> Transient heat conduction

<sup>2</sup> Thermal conductivity

<sup>3</sup> Convective coefficient

<sup>4</sup> Biot number

<sup>5</sup> Rice and Do

چندجمله‌ای توانی است که توسط دو و میفیلد<sup>۱</sup> به کار برده شد [۳۹].

اهدافی که تحقیق حاضر به طور کلی دنبال می‌کند، به شکل خلاصه از این قرارند:

- انجام آزمایش‌های استخراج در دو حالت ماده‌ی تکی و انبوه مواد و مقایسه‌ی پارامترهای مختلف همچون

غلظت‌های تعادلی و ضرایب نفوذ در دو حالت

- مدل‌سازی فرایند انتقال جرم در هر حالت و تخمین تغییرات متوسط غلظت بی‌بعد نشاسته، پروتئین و رطوبت

داخل نمونه‌ی سیب‌زمینی در هر زمان از فرایند

- بررسی تأثیر دما بر روی ضرایب نفوذ اجزای مختلف

- تعمیم مدل دو پارامتری آزورا (که پیش‌تر جهت تخمین حذف رطوبت و جذب جامد در فرایند آب‌زدایی اسمزی

استنتاج شده بود)، به پیش‌بینی میزان استخراج ماده‌ی جامد و جذب رطوبت حین فرایند لیچینگ

- مقایسه‌ی داده‌های به دست آمده از آزمایش با نتایج مدل‌سازی و بررسی میزان دقت مدل‌های مختلف (تحلیلی،

آزورا و مدل‌های تقریبی) در پیش‌بینی غلظت مواد حین فرایند استخراج و برشمردن معایب و مزایای هر مورد

بر اساس اهداف فوق، فصول مختلف پژوهش حاضر به این ترتیب نگارش یافته‌اند: در فصل دوم پیرامون

لیچینگ اجزای جامد و همچنین روش فرایند استخراج نشاسته از سیب‌زمینی در صنعت توضیحاتی ارائه شده

است. در مورد تاریخچه‌ی هر کدام از مدل‌های پیشنهادی در فصل ۳ بحث شده و سپس روابط به دست آمده برای

هر یک از مدل‌ها در فصل ۴ بیان شده است. در فصل ۵ روش انجام آزمایش‌ها و طریقه‌ی اندازه‌گیری رطوبت جذب

شده به داخل تیغه‌های سیب‌زمینی و نیز پروتئین و نشاسته‌ی استخراج شده از تیغه‌ها تشریح شده است. در انتها

در فصل ششم و پایانی این تحقیق نتایج آماری و نموداری حاصل از برازش مدل‌ها به تفکیک نوع مدل بیان شده و

یک جمع‌بندی کلی از تمامی مراحل این پژوهش ارائه شده است.

<sup>۱</sup> Do and Mayfield

## **فصل دوم:**

# **استخراج نشاسته از سیب زمینی**