



## بررسی مکانیزم انتقال رطوبت در بافت‌های گیاهی با استفاده از مدل‌های انتقال در محیط‌های متخلخل - قسمت اول: مدل‌های انتقال رطوبت

فاطمه مظفری غربا<sup>۱</sup>، محمدمهدی مهارلویی<sup>۲\*</sup>، احمد غضنفری مقدم<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

۳- استاد، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

\* ایمیل نویسنده مسئول: [maharlooei@uk.ac.ir](mailto:maharlooei@uk.ac.ir)

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۹/۱۰ - تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۹/۳۰)

### چکیده

انتقال آب در بافت‌های گیاهی پدیده‌ای پیچیده‌ای است. دیواره سلولی و غشای پلاسمایی نسبت به آب نفوذ پذیر بوده و میزان تبادل آب بین سلول و فضای بین سلولی به میزان اختلاف فشار آب درون سلولی و ارتجاع پذیری غشای سلولی بستگی دارد. حرکت آب در درون بافت‌های گیاهی شامل انتقال همزمان گرما و جرم است و بنابراین خواص ترموفیزیکی بافت گیاهی در این انتقال نقش مهمی دارند. فشار موینگی، نفوذپذیری ذاتی، نفوذپذیری نسبی، نفوذ رطوبت موثر و هدایت حرارتی از جمله خواص کلیدی حرارتی و انتقال مورد نیاز برای بررسی جامع مکانیزم انتقال رطوبت در بافت گیاهی هستند. مواد گیاهی را می‌توان یک محیط متخلخل در غیر ثابت نظر گرفت که حاوی حدود ۸۰ تا ۹۵ درصد آب است. نفوذ مولکولی برای گازها (بخار آب و هوا)، نفوذ موینگی برای مایع (آب) و مکانیسم‌های همرفت (جریان داری) در مدل خشک کردن در محیط متخلخل استفاده می‌شود. بدین ترتیب برای بررسی چگونگی حرکت آب در بافت‌های گیاهی می‌توان از مدل‌های چند فازی استفاده کرد. در مدل‌های چند فازی مکانیسم انتقال، انتقال آب را به دو صورت مایع و گاز را همزمان تحت تأثیر دما و سایر خصوصیات بافت گیاهی مورد بررسی قرار می‌دهد. در این مقاله بافت گیاهی به عنوان یک محیط متخلخل در نظر گرفته شده و مکانیزم‌هایی و عوامل موثر در انتقال رطوبت در این بافت‌ها مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند.

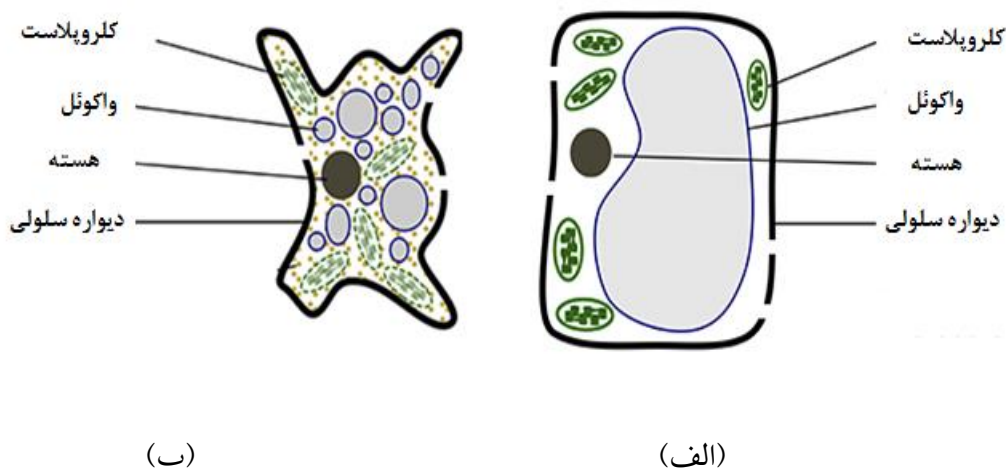
**واژه‌های کلیدی:** رطوبت، بافت، نفوذ، موینگی، تبخیر

## مقدمه

بافت‌های گیاهی تجمعی از سلول‌های استوانه‌ای یا منشوری نامنظم هستند که وظایف خاصی را در گیاهان به عهده دارند. تقریباً تمامی سلول‌های گیاهی دارای اجزای ساختمانی مشترکی هستند. دیواره سلولی که مختص سلول‌های گیاهی است تعیین‌کننده شکل، اندازه و سختی سلول بوده و به همراه غشای پلاسمایی که در قسمت داخلی آن واقع شده محتویات سلول را از بقیه سلول‌ها و محیط اطراف جدا می‌کند. دیواره سلولی و غشای پلاسمایی نسبت به آب نفوذپذیر بوده و میزان تبادل آب بین سلول و فضای بین سلولی به میزان ارتجاع پذیری غشایی بستگی دارد. یکی از دلایل تبادل آب بین سلول و محیط اطراف اختلاف غلظت محلول بین سیال درونی و سیال اطراف سلول می‌باشد (Yadav and Singh, 2014). هنگامیکه غلظت سیال درون سلول افزایش می‌یابد آب جذب سلول می‌شود و اندازه سلول در اثر آماس بزرگ می‌شود و بر عکس زمانیکه غلظت محلول خارج سلول بیشتر از داخل سلول باشد آب از سلول خارج شده و سلول چروکیده می‌شود. زمانیکه یک محصول آب خود را ازدست می‌دهد این آب از درون سلول خارج شده و ضمن کاهش فشار درونی و جداره سلول، منجر به تغییر شکل و کاهش حجم آن می‌گردد. این تغییرات به صورت چروکیدگی در محصول ظاهر می‌شوند. در اکثر مواقع چروکیدگی تاثیر منفی بر کیفیت محصول داشته و سعی بر آن است که با کنترل کاهش رطوبت تا حد ممکن کیفیت (Dadmohammadi *et al.*, 2020) محصول

حفظ شود. وضعیت و مقدار چروکیدگی تحت تاثیر نرخ کاهش رطوبت، دمای محصول و محیط و فشار تورم سلولی قرار می‌گیرد (Karunasena *et al.*, 2015). در شکل (۱) طرحواره‌ای از تغییرات یک سلول پس از دست دادن رطوبت نشان داده شده است.

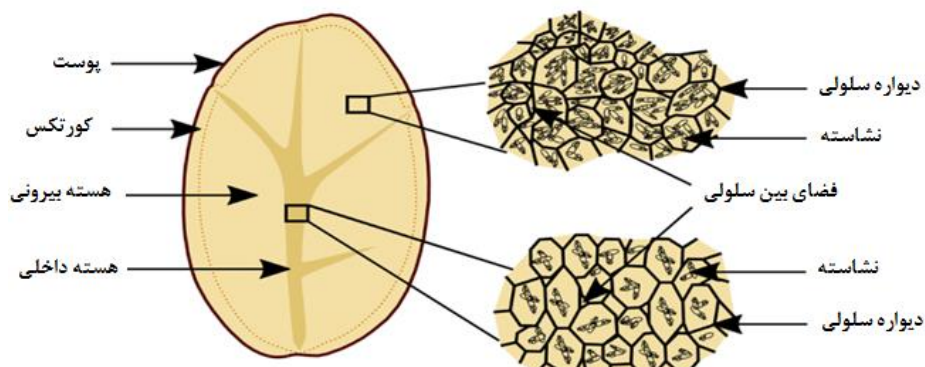
یک بافت گیاهی خود می‌تواند دارای سلول‌ها با شکل و اندازه مختلف باشد که هر کدام عملکرد متفاوتی می‌توانند داشته باشند. شکل (۲) برشی از یک سیب زمینی را نشان می‌دهد که تاکید می‌کند ساختار درون سیب زمینی یکنواخت نیست و قسمت درونی را می‌توان به دو بخش گوشت بیرونی و گوشت درونی تقسیم کرد. همانطور که در شکل نشان داده شده بافت بیرونی دارای سلول‌های بزرگتر و بافت درونی دارای سلول‌های متراکم‌تری است (Gancarz and Konstankiewicz, 2007) که این ساختارها بر انتقال رطوبت با درون این سلول‌ها و از درون به بیرون تاثیر می‌گذارند. محصولات کشاورزی به‌طور طبیعی دارای مقدار زیادی آب می‌باشند که این مقدار آب با گذشت زمان کاهش می‌یابد. انتقال آب از درون به بیرون به خاطر اختلاف فشار بخار بین داخل و بیرون محصول است که خود تابعی از دمای محصول می‌باشد. همانطور که سطح رطوبت کاهش می‌یابد ساختار سلولی تغییر کرده و انتقال کاهش می‌یابد. در مجموع انتقال آب در بافت‌های مواد غذایی و محصولات کشاورزی پدیده پیچیده‌ای است.



شکل ۱- تغییرات سلول در حین از دست دادن رطوبت: الف: قبل از از دست دادن رطوبت، ب: بعد از از دست دادن رطوبت

این سلول‌ها و از درون به بیرون تاثیر می‌گذارند. محصولات کشاورزی به‌طور طبیعی دارای مقدار زیادی آب می‌باشند که این مقدار آب با گذشت زمان کاهش می‌یابد. انتقال آب از درون به بیرون به خاطر اختلاف فشار بخار بین داخل و بیرون محصول است که خود تابعی از دمای محصول می‌باشد. همانطور که سطح رطوبت کاهش می‌یابد ساختار سلولی تغییر کرده و انتقال کاهش می‌یابد. در مجموع انتقال آب در بافت‌های مواد غذایی و محصولات کشاورزی پدیده پیچیده‌ای است.

یک بافت گیاهی خود می‌تواند دارای سلول‌ها با شکل و اندازه مختلف باشد که هر کدام عملکرد متفاوتی می‌توانند داشته باشند. شکل (۲) برشی از یک سیب زمینی را نشان می‌دهد که تاکید می‌کند ساختار درون سیب زمینی یکنواخت نیست و قسمت درونی را می‌توان به دو بخش گوشت بیرونی و گوشت درونی تقسیم کرد. همانطور که در شکل نشان داده شده بافت بیرونی دارای سلول‌های بزرگتر و بافت درونی دارای سلول‌های متراکتری است (Gancarz and Konstankiewicz, 2007) که این ساختارها بر انتقال رطوبت با درون



شکل ۲- برشی از یک غده سیب زمینی که نشان می‌دهد سلول‌های مختلفی در قسمت‌های مختلف غده وجود دارند.

مورد مطالعه قرار داد، مانند سنگ ها، خاک ها، بافت های گیاهی و جانوری، کاغذ و سایر مواد بسته بندی، غلات ذخیره شده و غذاهای بسته بندی شده در انبار سرد. در سیستم های غذایی، طیف عظیمی از فرآیندها را می توان به عنوان انتقال گرما و جرم از طریق محیط های متخلخل مشاهده کرد. به عنوان مثال می توان به خشک کردن، سرخ کردن، حرارت دادن در مایکروویو، تفت دادن گوشت، آبرسانی مجدد غلات صبحانه، لوبیا و سبزیجات خشک اشاره کرد (Datta, 2007a).

مواد غذایی گیاهی را می توان به عنوان یک محیط متخلخل ایده آل که حاوی حدود ۸۰ تا ۹۵ درصد آب است، در نظر گرفت. این مقدار زیاد آب منجر به تمایل بیشتر به رشد میکروارگانیسم ها می شود که میوه ها و سبزیجات را بسیار فاسد شدنی می کند (Aprajeeeta *et al.*, 2015). به همین دلیل سالانه حدود ۱/۳ میلیارد تن میوه و سبزیجات فصلی به دلیل عدم وجود تکنیک مناسب فرآوری از بین می رود. بنابراین، برای صرفه جویی در حجم عظیمی از مواد غذایی، لازم است از تکنیک های مناسب فرآوری مواد غذایی مانند کاهش رطوبت استفاده شود (Khan *et al.*, 2017).

خواص انتقالی بیومواد، به عنوان مثال، نفوذ حرارتی، نفوذ رطوبت و خواص دی الکتریک، به طور قابل توجهی به ساختار متخلخل مواد بستگی دارد. نفوذ مولکولی برای گازها (بخار آب و هوا)، نفوذ موئینگی برای مایع (آب) و مکانیسم های همرفت (جریان داری) در مدل خشک کردن در محیط متخلخل استفاده می شود (Turkan *et al.*, 2019). نیروهای محرک این نوع جریان ها، مانند

محصولات کشاورزی عموماً شکل هندسی مشخصی ندارند و از نظر ساختار و مواد تشکیل دهنده غیر همگن هستند و مکانیزم انتقال همزمان گرما و انتقال جرم که در طی فرآوری این مواد اتفاق می افتد به خوبی قابل درک نیست. اکثر محققان انتقال تک فازی (انتقال آب) را برای انتقال رطوبت در محصولات کشاورزی در نظر گرفته اند. مدل های تک فازی بیش از حد ساده شده اند و فیزیک اساسی بوده و بسیاری از فرآیندهای موجود در محصولات کشاورزی را در نظر نمی گیرند. در مقابل، یک مدل چند فازی مکانیسم های انتقال آب مایع، بخار آب و هوا را همزمان مورد بررسی قرار می دهد. مدل های چند فازی جامع تر هستند و بینش بهتری نسبت به مکانیسم های انتقال ارائه می کنند، زیرا می توانند پروفایل های زمانی و مکانی دما، آب مایع، بخار آب و هوای داخل مواد غذایی را در نظر بگیرند. بنابراین، یک مدل چند فازی برای پردازش مواد غذایی برای درک بهتر فرآیندها مورد نیاز است. با این حال، توسعه یک مدل چند فازی برای پردازش مواد غذایی، کار بسیار دشواری است، زیرا ویژگی ها و پدیده های فیزیکی به طور اساسی باید در نظر گرفته شوند (Khan *et al.*, 2018).

یک محیط متخلخل به یک جامد با فضای خالی (منافذ) اشاره دارد که با یک سیال (گاز یا مایع) پر شده است. به طور کلی، بسیاری از این منافذ به یکدیگر متصل هستند به طوری که انتقال جرم و گرما از طریق منافذ امکان پذیر است. تخلخل به کسر حجمی فضای خالی اشاره دارد. طیف گسترده ای از مواد را می توان به عنوان محیط متخلخل

پژوهشگران با مطالعه ساختار سلولی سعی بر مدل‌سازی ریاضی و شبیه‌سازی مکانیسم‌های اساسی موجود در سلول‌های گیاهی کرده تا فرآیندهایی مانند کاهش رطوبت، خشک کردن، رطوبت زنی یا خیساندن را بهینه کرده و محصولاتی با کیفیت بهتر تولید کنند. این روش به طور گسترده به منظور کاهش زمان و کارایی منابع در مقایسه با آزمایش‌های دنیای واقعی استفاده می‌شود. با این حال، تنها تعداد محدودی از مدل‌های عددی برای فرآوری مواد غذایی در دسترس است، که می‌توان آنها را به دو دسته کلی روش‌های مبتنی بر شبکه و روش‌های بدون شبکه<sup>۲</sup> تقسیم‌بندی کرد. روش‌های مبتنی بر شبکه مانند روش اجزا محدود<sup>۳</sup> (FEM) و روش تفاضل محدود<sup>۴</sup> (FDM) که محدودیت‌های واضحی در کار با مواد چند فازی غیرپیوسته تحت تغییر شکل بیش از حد و شرایط تغییر فاز دارند. به عنوان یک جایگزین، روش‌های بدون شبکه به دلیل توانایی‌های منحصربه‌فردشان در مدیریت چنین فیزیک پیچیده‌ای محبوبیت پیدا کرده‌اند. روش‌های بدون شبکه مزایای منحصربه‌فردی به ویژه از نظر عملکرد و تطبیق‌پذیری در این زمینه دارند و در آینده پتانسیل استفاده از آنها در زمینه‌های سازگاری با تغییرات دما، مدل‌سازی سه بعدی و مدل‌سازی چند مقیاسی وجود دارد (Mudiyansele et al., 2017).

### مدل‌سازی محیط‌های متخلخل

محیط متخلخل در سیستم‌های غذایی مقیاس‌های مختلفی را پوشش می‌دهد. به منظور مدل‌سازی فرآیندهای انتقال در سیستم‌های غذایی، می‌توان یک

اختلاف فشار، غلظت و نیروهای موینگی تحت تأثیر ماهیت متخلخل مواد غذایی قرار می‌گیرند (Joardder et al., 2016). انتقال در محیط متخلخل به هر دو ویژگی سیال و ماتریس جامد بستگی دارد. خواص ماتریس جامد مربوط به توزیع اندازه منافذ، شکل منافذ، تخلخل و غیره است که نفوذپذیری ذاتی مهم‌ترین عامل در مدل‌سازی محیط‌های متخلخل است (Datta, 2007a).

مدل‌سازی عددی ابزاری مؤثر برای بررسی مکانیسم‌های بنیادی ساختارهای سلولی گیاهی و دینامیک آنها است. این بسته به نیاز محصول یا فرآیند برای طیف گسترده‌ای از مواد قابل استفاده است، که باعث صرفه‌جویی در زمان، هزینه و سایر منابع صرف شده برای آزمایش با نمونه‌های گیاهی واقعی می‌شود و همچنین نتایج دقیقی را ارائه می‌دهد که منجر به افزایش درک اساسی در مورد پدیده‌های مختلف مرتبط می‌شود. بررسی اساسی حذف محتوای آب و تغییر شکل‌های مرتبط با آن در ساختار سلولی می‌تواند به بهبود عملکرد فرآیند از دست دادن رطوبت کمک کند. برای انجام این کار، درک عمیق تغییر شکل‌های سطح سلولی ضروری است و برای مطالعه تغییر شکل‌های سطح سلولی در میوه‌ها و سبزیجات (غذای گیاهی)، رویکردهای مدل‌سازی متعددی در دسترس است. این رویکردها با ویژگی‌های فیزیکی سطح توده‌ای مختلف مانند محتوای رطوبت، دمای خشک کردن، تخلخل و ویژگی‌های زیر سلولی داخلی مانند اندازه سلول، فشار تورمی و عوامل شکل سطح سلولی سروکار دارند (Mudiyansele et al., 2017).

2 - Mesh free

3 - Finite Element Method

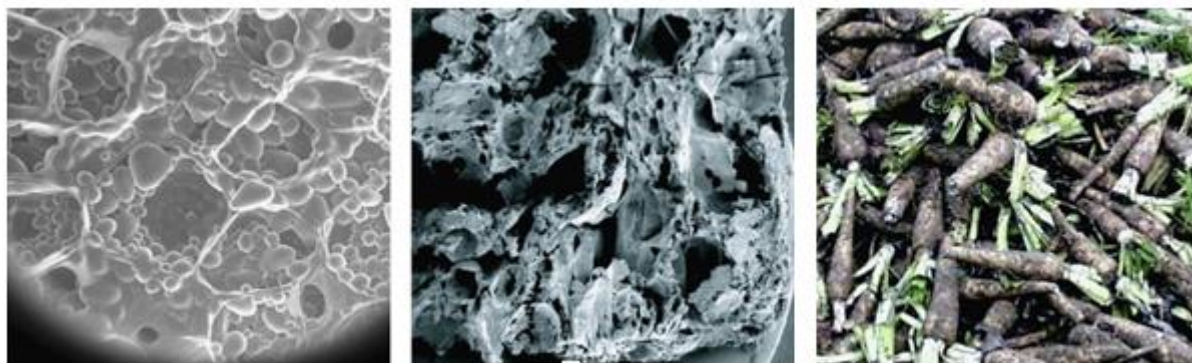
4 - Finite Difference Method

کاربرد این گونه مدل‌سازی محیط‌های متخلخل بیشتر در سرد کردن محصولات در سردخانه در نظر گرفته می‌شوند، مانند بررسی تغییرات وزن و دما در سرد کردن محصولات مانند هلو (Chen et al., 2020)، سیب درختی (Bishnoi & Aharwal, 2020) و سیب‌زمینی است (Chourasia and Goswami, 2006 a, b).

در حالت دوم ماده جامد در اندازه میکروسکوپی قرار دارد و جریان رطوبت هم یک سیال مایع و هم سیال به صورت گاز می‌تواند شکل پذیرد. در این حالت ترکیب ساختاری بافت گیاهی و ترکیبات شیمیایی آن تاثیر بسزایی در انتقال رطوبت درون بافت محصول دارند. از این جهت لازم است در این مطالعات شکل، اندازه و ساختار درونی و سلولی محصول مورد بررسی قرار گیرد. شکل (۳) سه گروه محصولات کشاورزی را در سه مقیاس متفاوت نشان می‌دهد. شکل سمت چپ محصول به صورت توده و در مقیاس طبیعی در نظر گرفته که اصل محصول جامد و فضای اطراف آن منافذ هستند. در شکل ۳ در قسمت وسط انتقال رطوبت در سطح مزوسکوپی و در سمت چپ در سطح میکروسکوپی نشان داده شده است.

محیط متخلخل را به دو گروه کلی تقسیم کرد که یکی شامل منافذ بزرگ و دیگری منافذ کوچک است. در منافذ بزرگ، جریان سیال بیشتر خارج از قسمت جامد است. نمونه ای از این منافذ بزرگ در خنک کردن محصولات حجمی مانند پرتقال و توت فرنگی است که در این نوع از محیط متخلخل، جریان سیال از طریق فضاهای خالی بین محصولات انباشته شده حرکت می‌کند و به عنوان یک آنالوگ ناویر-استوکس در نظر گرفته می‌شود که تعمیم جریان داری است. گروه دیگر شامل محیط‌هایی است که جریان در داخل جامد است (منافذ کوچک هستند). نمونه ای از این شامل انتقال رطوبت به داخل جامدات بسیاری از فرآیندهای غذایی مانند خشک کردن، سرخ کردن و حرارت دادن در مایکروویو است، که در مورد منافذ ریز برای جریان سیال از قانون داری استفاده می‌شود (Datta, 2007b):

در مقیاس بزرگ محصولاتی مانند سیب زمینی، پرتقال و انواع میوه‌ها جای دارند که میوه‌ها به عنوان ماده جامد و فضای بین آنها به عنوان خلل و فرج در نظر گرفته می‌شوند. در این مطالعات جریان سیال اغلب خارج از جامد است.



(ج)

(ب)

(الف)

دارد. اگرچه محققان اخیراً شروع به توسعه یک مدل چند فازی برای فرآوری مواد غذایی کرده‌اند، مفروضات ساده‌سازی زیادی برای غلبه بر پیچیدگی‌های فرایندها و عدم وجود خواص مواد مناسب مطرح شده است. در زیر فرایندهایی که باعث انتقال رطوبت چند فازی در محیط‌های متخلخل می‌شوند مورد بحث قرار می‌گیرند:

### ۱- نفوذ

نفوذ فرآیندی است که طی آن جرم در نتیجه گرادیان غلظت از یک قسمت سیستم به قسمت دیگر منتقل می‌شود. این فرآیند منجر به تعادل غلظت درون سیستم می‌شود و انتقال گرما نتیجه حرکت تصادفی مولکولی ناشی از گرادیان دما است. فیک شباهت بین انتقال حرارت و انتقال جرم را تشخیص داد و اولین کسی بود که با اتخاذ معادله فوریه برای هدایت گرما نفوذ را کمی کرد. شار نفوذ  $J_m$  را می‌توان با قانون اول نفوذ فیک بیان کرد (Srikiatden & Roberts, 2007):

$$J_m = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

که  $D$  ضریب نفوذ و  $\partial C / \partial x$  گرادیان غلظت است.

جریان با تغییر زمان  $t$  به  $t + \partial t$  را می‌توان با تغییر شار خالص مولکول‌های نفوذی از غلظت بالا به غلظت کم در یک لایه مایع محدود شده توسط دو صفحه موازی واقع در  $x$  و  $x + \partial x$  به شرح زیر بیان کرد:

از حالت دوم بیشتر در بررسی از دست دادن رطوبت محصولات کشاورزی مانند خشک کردن محصولاتی مانند موز (Turkan et al., 2019)، سیب‌زمینی (Pham et al., 2020; Tegenaw et al., 2022)، گلابی و هویج (Khan et al., 2017) استفاده می‌شود.

### مکانیزم‌های انتقال رطوبت

مکانیزم‌های مختلف انتقال گرما و جرم در طی فرآوری مواد غذایی سال‌هاست که موضوعی بسیار مورد توجه بوده و منجر به کارهای تحقیقاتی زیادی شده است (Khan et al., 2018). بحث‌های زیادی در مورد ایجاد یک مدل دقیق برای پیش‌بینی رفتار کاهش رطوبت، که کدام حالت بر انتقال رطوبت حاکم است و اینکه آیا اثرات انتقال حرارت باید در نظر گرفته شود یا خیر، وجود دارد. این مشکل در سیستم‌های پیچیده‌ای که در آن چندین مکانیزم می‌تواند باعث انتقال رطوبت در محصول شود، وجود دارد، هرچند تنها یک مکانیزم در یک زمان مشخص در انتقال رطوبت غالب است (Srikiatden & Roberts, 2007). بنابراین، یک مدل چند فازی برای پردازش مواد غذایی برای درک بهتر فرایندها مورد نیاز است. با این حال، توسعه یک مدل چند فازی برای پردازش مواد غذایی، کار بسیار دشواری است، زیرا ویژگی‌ها و پدیده‌های فیزیکی اساسی باید در نظر گرفته شوند. علاوه بر این، کمبود شدیدگی در داده‌های مربوط به خواص مواد و انتقال مناسب برای توسعه مدل چند فازی وجود

که نشان دهنده توانایی گونه A برای نفوذ در محیط است (Khan et al., 2018).

## ۲- جریان تحت فشار:

یکی از دلایل انتقال در مواد دارای خلل و فرج جریان تحت فشار<sup>۸</sup> می باشد. این جریان باعث حرکت حجمی در اثر اختلاف فشار می باشد. مایع و گاز (هوا یا بخار) می تواند توسط این مکانیزم داخل منافذ منتقل می شوند. جریان تحت فشار را می توان با قانون دارسی همانطور که در زیر مورد بحث قرار می گیرد بیان کرد:

جریان تحت فشار برای گاز (Khan et al., 2018):

$$n_g^{pressure} = -\rho_g \frac{k_g}{\mu_g} \frac{\partial P}{\partial s} \quad (4)$$

که در آن n شار جرمی بخار ناشی از اثر فشار گاز  $\rho_g$  (kg/m<sup>2</sup> s)، چگالی گاز (kg/m<sup>3</sup>) و  $\mu_g$  ویسکوزیته دینامیکی گاز (kg/m s) است و برای جریان تحت فشار برای مایع:

$$n_l^{pressure} = -\rho_l \frac{k_l}{\mu_l} \frac{\partial P}{\partial s} \quad (5)$$

که n شار جرم ناشی از اثر فشار سیال مایع (kg/m<sup>2</sup> s)، چگالی مایع (kg/m<sup>3</sup>) و  $\mu_l$  ویسکوزیته دینامیکی مایع (kg/m s) است.

## ۳- تبخیر

تبخیر<sup>۹</sup> فرآیند تغییر فاز است که طی آن اتم‌ها یا مولکول‌ها در فاز مایع انرژی کافی برای ورود به

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{1}{\partial x} [J(x) - J(x + \partial x)] = -\frac{\partial J}{\partial x} \quad (2)$$

جایگزینی شار جرمی بیان شده در معادله (۱) در (۲) منجر به قانون دوم نفوذ فیک می شود:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial C}{\partial X} \right) \quad (3)$$

در حین انتقال آب در محیط متخلخل، دو نوع نفوذ در مورد مدلسازی چند فازی باید در نظر گرفته شود: نفوذ موئینگی<sup>۶</sup> و نفوذ باینری<sup>۷</sup>. نفوذ موئینگی فرآیند ناشی از کشش سطحی است که در تماس مایع و سطوح دیگر رخ می دهد. نفوذ موئینگی برای انتقال مایع در مدل سازی پدیده‌های انتقال استفاده می شود، نیرویی که مسئول این عمل است، نیروی موئینگی نامیده می شود که با جاذبه بین مولکول‌های مایع و ذرات جامد در محیط متخلخل تعریف می شود. علاوه بر این، افزایش موئینگی نتیجه اختلاف فشار سطحی است. این نیروهای موئینگی در علوم غذایی بسیار مهم هستند

زیرا مواد غذایی نمی‌توانند به طور کامل توسط نیروی گرانش تخلیه شوند. علاوه بر این، آب در مناطقی که ذرات جامد حاوی مقدار کم آب هستند، محکم نگه داشته می‌شود و در مناطقی که رطوبت زیاد هست، به آرامی نگه داشته می‌شود. نفوذباینری به عنوان حرکت گاز (بخار یا هوار) از ناحیه ای با غلظت بالاتر به ناحیه ای با غلظت کمتر تعریف می‌شود. براین اساس، ضریب نفوذپذیری باینری یک خاصیت انتقال است



قابل انتقال آب مایع، هوا و بخار آب پر شده است.

۲- تمام فازها (جامد، مایع و گازها) پیوسته در نظر گرفته می‌شوند.

۳- انتقال آب مایع به دلیل جریان تحت فشار ناشی از گرادیان فشار گاز، جریان مویرگی و تبخیر رخ می‌دهد. انتقال بخار و هوا ناشی از گرادیان فشار گاز و نفوذ باینری است.

۴- تغییر شکل مواد غذایی (چروکیدگی) در طول مدل‌سازی در اکثر مطالعات نادیده گرفته شده است. چروکیدگی باید با انتقال گرما و جرم در طول مدل‌سازی در نظر گرفته شود، اما برای جلوگیری از پیچیدگی‌های محاسباتی عموماً نادیده گرفته می‌شود.

۵- فاز گاز ترکیب ایده‌آلی از بخار آب و هوا در نظر گرفته می‌شود.

۶- در بیشتر موارد، اثر گرانش نادیده گرفته شد، زیرا اثر جاذبه روی یک نمونه غذا در مقایسه با اثر مویرگی بسیار ضعیف است.

۷- به دلیل نبود اطلاعات دقیق، خواص مواد معمولاً ایزوتروپیک در نظر گرفته می‌شود.

۸- در مورد فازهای مایع و گاز، گاهی هدایت حرارتی ثابت در نظر گرفته می‌شد.

#### خواص محصولات کشاورزی موثر بر انتقال رطوبت

مراحل مختلف فرآوری مواد غذایی شامل انتقال همزمان گرما و جرم است و بنابراین خواص

فاز گاز به دست می‌آورند. در مورد فرآوری مواد غذایی، تبخیر نقش مهمی ایفا می‌کند زیرا مولکول‌های آب فقط به صورت بخار می‌توانند جابجا شوند و بخار نتیجه فرآیند تبخیر است. برای محاسبه نرخ تبخیر در داخل نمونه از یک فرمول غیرتعادلی استفاده می‌شود (Kumar et al., 2018):

$$Revap = K_{evap} \frac{M_v}{RT} (p_{v,eq} - p_v) \quad (6)$$

در اینجا  $M_v$  جرم مولی بخار ( $\text{kg mol}^{-1}$ )،  $p_{v,eq}$  فشار بخار تعادلی (Pa)،  $p_v$  فشار بخار (Pa) و  $K_{evap}$  ثابت تبخیر ( $\text{s}^{-1}$ ) است.

#### برخی فرضیات برای انتخاب مکانیزم انتقال رطوبت

مدل‌های ریاضی چند فازی برای کاهش رطوبت محصولات کشاورزی برای درک و توجیه چگونگی انتقال رطوبت در طی فرآیندهای مختلف جذب یا دفع رطوبت بسیار مفید هستند. با این حال، مدل‌سازی این فرآیندها با در نظر گرفتن ویژگی‌های متغیر مواد و تغییر شکل مواد بسیار پیچیده است. بسیاری از محققان در توسعه مدل‌های خود سعی کرده‌اند با کاهش این پیچیدگی‌ها و استفاده از فرضیات ساده‌سازی، مانند نادیده گرفتن انقباض، بر مشکل غلبه کنند. مفروضاتی که در این رابطه در نظر گرفته می‌شود به شرح زیر است (Khan et al., 2018; Kumar et al., 2018):

۱- محصول کشاورزی را می‌توان به عنوان یک محیط متخلخل در نظر گرفت، که منافذ از سه فاز

با مدل Kozeny-Carman بدست آورد (Kumar *et al.*, 2018).

$$\kappa_i = 5.578 \times 10^{-12} \frac{\phi_g^3}{(1 - \phi_g)^2} \quad (0.39 < \phi_g < 0.77) \quad (8)$$

## ۲- نفوذ موئینگی

مایع درون مواد غذایی به دلیل تفاوت در عملکرد موئینگی می‌تواند از مواد با غلظت بالاتر به غلظت کمتر جریان یابد. این جریان به عنوان جریان غیراشباع شناخته می‌شود و در فرآوری مواد غذایی بسیار مهم است. در طول مدل‌سازی یک جریان چند فاز برای سیستم‌های مختلف پردازش مواد غذایی، خاصیت نفوذ موئینگی نقش حیاتی ایفا می‌کند.

نفوذ مویرگی آب مایع برای کاهش رطوبت مهم است. در صورت عدم وجود گرادیان فشار، نیروی مویرگی عامل اصلی محرکه آب مایع در کاهش رطوبت است. نفوذ مویرگی، متناسب با تغییرات فشار بر تغییرات اشباع آب است و تابعی از فشار مویرگی است.

از معادله زیر می‌توان برای نفوذ مویرگی برای رطوبت کم تا زیاد در جایی که فرض شده است که نفوذ مویرگی فقط به رطوبت وابسته است، استفاده کرد (Kumar *et al.*, 2018).

$$D_C = 10^{-8} \exp(-2.8 + 2M_d) \quad (9)$$

همچنین از رابطه مشابهی برای نفوذ مویرگی و ارتباط آن با رطوبت می‌توان استفاده کرد:

$$D_C = 10^{-8} \exp(-6.88 + 8M_w) \quad (10)$$

ترموفیزیکی مناسب برای مدل‌سازی فرآیندها ضروری است. فشار موئینگی، نفوذپذیری ذاتی، نفوذپذیری نسبی، نفوذ رطوبت موثر و هدایت حرارتی از جمله خواص کلیدی حرارتی و انتقال مورد نیاز برای شبیه‌سازی جامع یک مدل خشک کردن هستند. به طور خاص، خواص مربوط به انتقال آب در سطح سلولی مانند نفوذپذیری آب محدود و نفوذپذیری برای اکثر مواد دارای رطوبت شناخته شده نیست (Khan *et al.*, 2018). خواص عمده ای که احتمالاً برای توسعه مدل‌های چند فاز پردازش مواد غذایی در سطح ماکروسکوپی ضروری است در زیر مورد بحث قرار می‌گیرد:

## ۱- نفوذپذیری

نفوذپذیری عامل مهمی در توصیف انتقال آب به دلیل گرادیان فشار در محیط متخلخل اشباع نشده است. مقدار نفوذپذیری میزان تولید فشار در داخل مواد را تعیین می‌کند. هرچه نفوذپذیری آن کوچکتر باشد، انتقال رطوبت کمتر و فشار داخلی نیز بیشتر است و بالعکس. نفوذپذیری یک ماده، محصولی از نفوذپذیری ذاتی و نفوذپذیری نسبی است، یعنی (Gulati and Datta, 2013):

$$\kappa = \kappa_i \kappa_{i,r} \quad (7)$$

اندازه‌گیری مقادیر نفوذپذیری برای مواد قابل تغییر شکل مانند مواد غذایی دشوار است. نفوذپذیری ذاتی به ساختار منافذ مواد بستگی دارد و از چندین مدل برای محاسبه نفوذپذیری ذاتی استفاده شده است. نفوذپذیری ذاتی برای بافت سیب را می‌توان

پدیده‌های حمل و نقل در طول خشک کردن یا فرآوری مواد غذایی که شامل تغییرات در حجم فاز جامد و غلظت فازهای متحرک است، ایفا می‌کند. برای یک غذای جامد، چگالی مواد به عنوان رابطه بین جرم جامد و حجم آن تعریف می‌شود.

چگالی به ترتیب شامل چگالی ظاهری و چگالی واقعی با توجه به حجم حجیم و حجم واقعی است. حجم واقعی حجمی است که فقط فاز جامد را اشغال می‌کند. یکی از راه‌های بدست آوردن حجم فاز جامد نمونه، فشرده سازی مکانیکی نمونه و اندازه گیری حجم آن است. چگالی واقعی جرم تقسیم بر حجم واقعی است. چگالی ظاهری در محیط متخلخل چند فازی را می‌توان به صورت زیر نوشت (Khan et al., 2018):

$$\rho_{app} = \rho_s(1 - \phi) + \phi S_w \rho_w \quad (13)$$

که در آن  $\rho_{app}$  و  $\rho_s$  به ترتیب چگالی ظاهری و چگالی واقعی هستند.

#### ۵- تخلخل

تخلخل<sup>۱۱</sup> یک ماده نشان دهنده حجم فضای موجود در محصول غذایی است. تمام مواد غذایی مرطوب دارای مقداری تخلخل (فضای خالی) در خود هستند. این منافذ داخلی سه نوع هستند: منافذ بسته که فضای منافذ از همه طرف محصور است. منافذ کور، جایی که یک انتهای آن بسته است و منافذ باز که جریان می‌تواند عبور کند. هر ماده متخلخل دارای رطوبت یک رابطه معکوس بین تخلخل و میزان رطوبت نشان می‌دهد، به عنوان مثال، اگر تخلخل افزایش یابد، میزان رطوبت کاهش می‌یابد. تعیین

که  $M_w$  و  $M_d$  به ترتیب محتوای رطوبتی بر پایه خشک و تر هستند.

#### ۳- ویسکوزیته

در یک ماده مرطوب، ویسکوزیته یک ویژگی فیزیکی مهم است که مقاومت داخلی سیال در برابر جریان را توصیف می‌کند و ممکن است به عنوان معیاری برای اصطکاک سیال در نظر گرفته شود. ویسکوزیته سیالات به طور قابل توجهی با دما و فشار تغییر می‌کند، بنابراین کنترل خوب این دو پارامتر برای اندازه گیری دقیق ویسکوزیته مورد نیاز است. ویسکوزیته آب (Kumar et al., 2016) و گاز (Gulati and Datta, 2013) به ترتیب از معادلات ۱۱ و ۱۲ بر حسب دما به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\mu_w = \rho_w e^{(-19.143 + \frac{1540}{T})} \quad (11)$$

$$\mu_g = 0.017 \times 10^{-3} \left( \frac{T}{273} \right)^{0.65} \quad (12)$$

که در آن  $\mu_w$  و  $\mu_g$  به ترتیب ویسکوزیته آب و گاز (kg/m s) و  $\rho_w$  چگالی آب (kg/m<sup>3</sup>) است.

#### ۴- چگالی

چگالی یک ویژگی ساختاری مهم برای پردازش مواد غذایی، به ویژه در خشک کردن، سرخ کردن و گرم کردن مواد غذایی است. در مورد مدل سازی فرآیند غذایی، چگالی نقش مهمی در مطالعه

اساس وزن تر نمونه که پیش‌بینی‌هایی را ۱۵٪ بیشتر از مقادیر تجربی ارائه می‌دهد استفاده کرد:

$$K = 0.148 + 0.493M_w \quad (15)$$

همچنین از رابطه زیر برای محاسبه مقدار رسانایی حرارتی در فرآیندهای چند فازی استفاده می‌شود (Khan et al., 2018):

$$\frac{k_{th,eff} - \phi k_{th,air}}{(1-\phi-X)k_{th,s} + Xk_{th,w}} = 0.996 \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^{0.713} X^{-0.285} \quad (16)$$

$$1 - \phi + \frac{k_{th,air}}{\left(\frac{k_{th,w}}{k_{th,w,ref}}\right)}$$

که در آن  $k_{th,w}$  و  $k_{th,air}$ ،  $k_{th,s}$ ،  $k_{th,eff}$  رسانایی گرمایی موثر (W/m K) به ترتیب برای جامد، هوا و آب هستند.  $X$  کسر جرمی آب مواد غذایی است.  $k_{th,w}$  و  $T_{ref}$  به ترتیب دما و رسانایی مرجع در صفر درجه سانتی‌گراد هستند.

### حل معادلات

هدف از حل معادلات رسیدن به خروجی‌هایی است که برای محققین در زمینه‌های مختلف اهمیت دارد. طیف گسترده‌ای از نتایج برای مدل‌های تک‌فازی و چند فازی وجود دارد که می‌تواند به دلیل خواص مواد و شرایط مختلفی باشد، که محققان مختلف در مطالعات خود در نظر گرفته‌اند. بنابراین، بدست آوردن یک ایده کلی از خروجی مدل‌ها دشوار است (Khan et al., 2017). بطور کلی دو روش کدنویسی و استفاده از نرم افزارهای موجود برای بررسی و حل معادلات انتقال رطوبت توسط پژوهشگران مورد بررسی و استفاده قرار می‌گیرد. در روش کد نویسی که روشی برای حل عددی مسائل برای اهداف تحقیقاتی است،

تخلخل مستلزم آگاهی از حجم کل یا ظاهری و حجم خالی موجود در ماتریس مواد است. تفاوت آنها به عنوان حجم ذرات نیز شناخته می‌شود. برخی از محققین معادله زیر را برای تعیین تخلخل پیشنهاد کرده‌اند:

$$\phi = 1 - \frac{0.852 - 0.462 \exp(-0.66M_d)}{1.54 \exp(-0.051M_d) - 1.15 \exp(-2.4M_d)} \quad (14)$$

که در آن  $\phi$  تخلخل و  $M_d$  محتوای رطوبت بر پایه وزن خشک می‌باشد (Khan et al., 2018).

### ۶- رسانایی حرارتی

رسانایی حرارتی<sup>۲</sup> یکی از مهمترین خواص فیزیکی مواد غذایی است که برای تجزیه و تحلیل پردازش مواد غذایی استفاده می‌شود که در آن انتقال گرما و جرم به طور همزمان اتفاق می‌افتد. محتوای رطوبت مهمترین عامل در تعیین هدایت حرارتی است. این ممکن است به دلیل بزرگی نسبی رسانایی آب و سایر مواد غذایی باشد. هدایت حرارتی غذاها با کاهش رطوبت کاهش می‌یابد. یافتن یک رابطه خطی بین هدایت حرارتی و رطوبت معمول است. این نوع همبستگی توسط دیگران بررسی شده است. هنگامی که چنین ویژگی‌هایی از مواد غذایی برای تجزیه و تحلیل فرآیندهای غذایی مورد نیاز است، عملی‌ترین راه استفاده از مقادیر پیش‌بینی شده از مدل‌های نظری یا تجربی است.

می‌توان از یک مدل ساده تجربی خطی برای پیش‌بینی رسانایی حرارتی میوه‌ها و سبزیجات بر

<sup>۲</sup>Thermal conductivity

تحلیل المان محدود است که برای مسائل انتقال حرارت چندفیزیکی همراه با تحلیل ساختاری استفاده می‌شود.

بر اساس بررسی تحقیقات انجام شده بر روی مدل‌سازی فرآیندهای انتقال رطوبت در محصولات کشاورزی توزیع رطوبت جزء بیشترین خروجی-های بررسی شده است که از حل عددی معادلات انتقال رطوبت بدست می‌آیند. در مراحل اولیه از دست دادن رطوبت، سطح رطوبت به دلیل نفوذ مویبگی زیاد در رطوبت اولیه بالا به طور یکنواخت کاهش می‌یابد. این معادل یک وضعیت حرکت حجمی در انتقال حرارت است. عدم یکنواختی در پروفایل رطوبت زمانی شروع به پیشرفت می‌کند که مقدار رطوبت در نزدیکی سطح تا حدی کاهش یابد که باعث کاهش قابل توجه نفوذ مویبگی می‌شود (Datta, 2007b). در محصولات با رطوبت کم مقدار رطوبت سطح به دلیل افزایش سریع دمای سطح، سریع کاهش می‌یابد. با این حال، رطوبت داخل به آرامی کاهش می‌یابد زیرا نفوذ مویبگی در این مناطق بسیار پایین است (Ni et al., 1999). با خشک شدن سطح، ناحیه تبخیر به داخل حرکت می‌کند. با این حال، با ضخیم تر شدن پوسته و رسانایی حرارتی پایین آن سرعت انتقال حرارت کاهش می‌یابد.

علاوه بر رطوبت، نمودارهای توزیع فشار درون بافت گیاهی، از دیگر خروجی‌های مهم حل عددی معادلات انتقال رطوبت است زیرا با گذشت زمان و از دست دادن رطوبت، فشار بخار درون بافت کاهش یافته و بر خروج رطوبت تاثیر می‌گذارد. آگاهی از نرخ کاهش فشار و توزیع فشار به درک

توسعه کد از ابتدا ارجح است، اما معمولاً بسیار وقت گیر است. در مورد مدل‌های فرآوری مواد غذایی، محققان مختلف از سیستم کدنویسی برای حل معادلات استفاده کردند. برای کدنویسی می‌توان از زبان‌های برنامه نویسی مانند FORTRAN، C++، VISUAL Basic، MATLAB و JAVA استفاده کرد. اگرچه کدنویسی روشی موثر است، اما محققان معمولاً در توسعه کد خود با مشکلات زیادی روبرو هستند و فرآیند کدنویسی بسیار زمان بر است. علاوه بر این، درک و استفاده از کدی که توسط محقق دیگری ایجاد شده است برای یک محقق دشوار است (Khan et al., 2018).

بسیاری از نرم افزارهای تجاری CFD برای حل مدل ریاضی محیط‌های متخلخل، از جمله ANSYS، FLUENT، COMSOL Multiphysics، ADINA و PHOENICS، STAR-CD، CFX توسعه یافته‌اند. از این میان، COMSOL Multiphysics یک نرم افزار چند منظوره است که بر اساس روش‌های عددی پیشرفته، برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی مسائل مبتنی بر فیزیک است. اخیراً اکثر محققان از این نرم افزار برای پیاده‌سازی کارآمد مدل خود در سیستم‌های مختلف پردازش مواد غذایی مانند خشک کردن، پخت، پخت و پز و برشته کردن استفاده کرده‌اند. نرم‌افزار FLUENT یک نرم‌افزار چند منظوره براساس حجم محدود است که بعد از COMSOL بیشترین کاربرد را دارد. سومین نرم‌افزاری که بیشترین کاربرد را دارد، نرم افزار ANSYS است (Khan et al., 2018). این نرم افزار یک ابزار

می دهد توصیه نمی شود. برای مثال،  $R^2$  و  $\chi^2$  فقط دقت مدل را توصیف می کنند.

### نتیجه گیری

محصولات کشاورزی به طور طبیعی دارای مقدار زیادی آب می باشند که این مقدار آب با گذشت زمان کاهش می یابد. انتقال آب از درون به بیرون به خاطر اختلاف فشار بخار بین داخل و بیرون محصول است. بررسی و مدل سازی چگونگی انتقال رطوبت درون محصول به نگهداری بیشتر محصولات کمک شایان توجهی می نماید. مدل های استفاده شده در منابع برای بررسی انتقال رطوبت اغلب سه مدل نفوذ شامل نفوذ موینگی و نفوذ باینری، جریان تحت فشار و تبخیر هستند. خصوصیات فیزیکی و حرارتی محصولات شامل چگالی، بافت، ضریب نفوذ رطوبت و تخلخل از جمله فاکتورهایی هستند که بر سرعت و میزان انتقال رطوبت تأثیر می گذارند. امروزه تکنیک های حل عددی معادلات انتقال رطوبت با استفاده از کدنویسی یا بهره گیری از نرم افزارهای تجاری برای بررسی انتقال حرارت درون بافت های متخلخل گیاهی انجام می شود.

بهتر انتقال رطوبت و مسیر حرکت آن کمک می کند (Mudiyanselage, et al., 2017). از سایر خروجی های حل عددی مدل های انتقال رطوبت می توان به شار رطوبت و شار بخار اشاره کرد.

برای تعیین دقت پیش بینی مدل ها و صحت سنجی حل معادلات حاکم با روش های عددی، محققان از چندین شاخص آماری استفاده می کنند که امکان ارزیابی مدل را با داده های تجربی فراهم می کند. مربع کای ( $\chi^2$ ) و ضریب تبیین ( $R^2$ ) اغلب مورد استفاده قرار می گیرند. مقادیر مربع کای پایین و مقادیر ضریب تبیین بالا معیارهای انتخاب برای برازش خوب مدل ها هستند. علاوه بر این، از میانگین درصد انحراف نسبی ( $p\%$ ) استفاده می شود، زمانی که  $p < 10\%$  باشد، نشان می دهد یک مدل قابل قبول یا با برازش خوب است. بعضی از محققین از میانگین انحراف خطای (MBE)، ریشه میانگین مربع خطا (RMSE) یا سایر معیارهای آماری استفاده می کنند. برخی از مطالعات مقایسه ساده داده های پیش بینی شده و تجربی را از طریق منحنی های رطوبت و دما گزارش کردند. دقت در اعتبارسنجی مدل مهم است. علاوه بر این، استفاده از آماری که فقط اطلاعاتی در مورد دقت یا صحت

## REFERENCES

- Aprajeeta, J., Gopirajah, R., and Anandharamakrishnan, C. 2015. Shrinkage and porosity effects on heat and mass transfer during potato drying. *Journal of Food Engineering* 144, 119-128.
- Bishnoi, R., and Aharwal, K. 2020. Experimental investigation of air flow field and cooling heterogeneity in a refrigerated room. *Engineering Science and Technology, an International Journal* 23, 1434-1443.

- Chen, Y. M., Song, H. Y., Chen, Z. S., Zhao, R., Su, Q., Jin, P. Y., Sun, Y. S., and Wang, H. 2020. Sensitivity analysis of heat and mass transfer characteristics during forced- air cooling process of peaches on different air- inflow velocities. *Food Science & Nutrition* 8, 6592-6602.
- Chourasia, M., and Goswami, T. 2006<sup>a</sup>. Simulation of transport phenomena during natural convection cooling of bagged potatoes in cold storage, Part I: Fluid flow and heat transfer. *Biosystems engineering* 94, 33-45.
- Chourasia, M., and Goswami, T. 2006<sup>b</sup>. Simulation of transport phenomena during natural convection cooling of bagged potatoes in cold storage, Part II: Mass transfer. *Biosystems engineering* 94, 207-219.
- Dadmohammadi, Y., Kantzas, A., Yu, X., and Datta, A. K. 2020. Estimating permeability and porosity of plant tissues: Evolution from raw to the processed states of potato. *Journal of Food Engineering* 277, 109912.
- Datta, A. 2007<sup>a</sup>. Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. I: Problem formulations. *Journal of food engineering* 80, 80-95.
- Datta, A. 2007<sup>b</sup>. Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. II: Property data and representative results. *Journal of food engineering* 80, 96-110.
- Gancarz, M., and Konstankiewicz, K. 2007. Changes of cellular structure of potato tuber parenchyma tissues during storage. *Research in Agricultural Engineering* 53, 75.
- Gulati, T., and Datta, A. K. 2013. Enabling computer-aided food process engineering: property estimation equations for transport phenomena-based models. *Journal of Food Engineering* 116, 483-504.
- Joardder, M. U., Karim, A., Kumar, C., and Brown, R. J. 2016. Effect of porosity on drying kinetics and food properties. In "Porosity", pp. 47-64. Springer.
- Karunasena, H., Gu, Y., Brown, R., and Senadeera, W. 2015. Numerical investigation of case hardening of plant tissue during drying and its influence on the cellular-level shrinkage. *Drying Technology* 33, 713-734.
- Khan, M. I. H., Joardder, M., Kumar, C., and Karim, M. 2018. Multiphase porous media modelling: A novel approach to predicting food processing performance. *Critical reviews in food science and nutrition* 58, 528-546.
- Khan, M. I. H., Kumar, C., Joardder, M. U. H., and Karim, M. 2017. Determination of appropriate effective diffusivity for different food materials. *Drying Technology* 35, 335-346.
- Kumar, C., Joardder, M., Farrell, T. W., and Karim, M. 2016. Multiphase porous media model for intermittent microwave convective drying (IMCD) of food. *International Journal of Thermal Sciences* 104, 304-314.
- Kumar, C., Joardder, M. U., Farrell, T. W., Millar, G. J., and Karim, A. 2018. A porous media transport model for apple drying. *Biosystems engineering* 176, 12-25.
- Mudiyanselage, C. R., Karunasena, H., Gu, Y., Guan, L., and Senadeera, W. 2017. Novel trends in numerical modelling of plant food tissues and their morphological changes during drying—a review. *Journal of Food Engineering* 194, 24-39.

- Ni, H., Datta, A., and Torrance, K. 1999. Moisture transport in intensive microwave heating of biomaterials: a multiphase porous media model. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 42, 1501-1512.
- Pham, N. D., Khan, M., and Karim, M. 2020. A mathematical model for predicting the transport process and quality changes during intermittent microwave convective drying. *Food chemistry* 325, 126932.
- Srikiatden, J., and Roberts, J. S. 2007. Moisture transfer in solid food materials: A review of mechanisms, models, and measurements. *International Journal of Food Properties* 10, 739-777.
- Tegenaw, P. D., Verboven, P., and Vanierschot, M .2022. Numerical and experimental study of airflow resistance across an array of sliced food items during drying. *Journal of Food Engineering* 312, 110739.
- Turkan, B., Canbolat, A. S., and Etemoglu, A. B. 2019. Numerical investigation of multiphase transport model for hot-air drying of food. *Journal of Agricultural Sciences* 25, 518-529.
- Yadav, A. K., and Singh, S. V. 2014. Osmotic dehydration of fruits and vegetables: a review. *Journal of food science and technology* 51, 1654-1673.





## Review of Moisture Movement Mechanisms in Plant Tissues Using Transfer Models in Porous Media – Part I: Moisture Transfer Models

Fatemeh Mozafari Ghorba<sup>1</sup>, Mohammadmehdi Maharlooei<sup>2\*</sup>, Ahmad Ghazanfari Moghaddam<sup>3</sup>

<sup>1</sup>PhD student Biosystems Engineering Department of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

<sup>2</sup> Associate Professor, Biosystems Engineering Department of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

<sup>3</sup> Professor, Biosystems Engineering Department of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

\* Corresponding Author's Email: maharlooei@uk.ac.ir

(Received: December. 1, 2021 – Accepted: December. 21, 2021)

### ABSTRACT

Water transfer in plant tissues is a complex phenomenon. The cell wall and plasma membrane are permeable to water and the amount of water exchange among cells and the intercellular space mainly depends on the amount of intracellular water pressure and the viability of the cell membrane. The movement of water within the plant tissues includes simultaneous heat and mass transfer and therefore the thermophysical properties of the plant tissue plays an important role in this transition. Capillary pressure, intrinsic permeability, relative permeability, effective moisture diffusivity, and thermal conductivity are the key thermal and transport properties needed for comprehensive investigation of moisture transfer mechanism in plant tissue. The plant material can be considered as a porous medium in a non-steady state, which contains about 10 - 80% water. Molecular diffusion for gases (water vapor and air), capillary influence for the liquid (water) and advection mechanisms (Darcy flow) are used in the drying model in porous media. Thus, multiphase models can be used to study the water movement in plant tissues. In multiphase models of transmission mechanism, transfer of water into two types of liquid and gas is investigated simultaneously under the influence of temperature and other properties of plant tissue. In this article, the plant tissue is considered as a porous medium and the factors affecting the moisture transfer in these tissues are discussed.

**Keywords:** Moisture, Tissue, Diffusion, Capillary, Evaporation