بررسی مکانیزم انتقال رطوبت در بافت‌های گیاهی با استفاده از مدل های انتقال در محیط‌های متخلخل – قسمت اول: مدل های انتقال رطوبت

فاطمه مظفری غربا[۱]، محمدمهدی‌مهارلویی[۲*]، احمد غضنفری مقدم[۳]

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

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

چکیده

انتقال آب در بافت‌های گیاهی پدیده‌ای‌پیچیده ای 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 ارتجاع‌پذیری 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 مویینگی، 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 می توان 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 مویینگی برای مایع (آب) و مکانیسم های همرفت (جریان دارسی) در مدل خشک کردن در محیط متخلخل استفاده می‌شود. بدین ترتیب برای بررسی چگونگی حرکت آب در بافت‌های گیاهی می‌توان از مدل های چند فازی استفاده کرد. در مدل های 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 بافت ها مورد بحث و بررسی قرار گرفته اند.

واژه‌های کلیدی: رطوبت، بافت، نفوذ، موئینگی، تبخیر

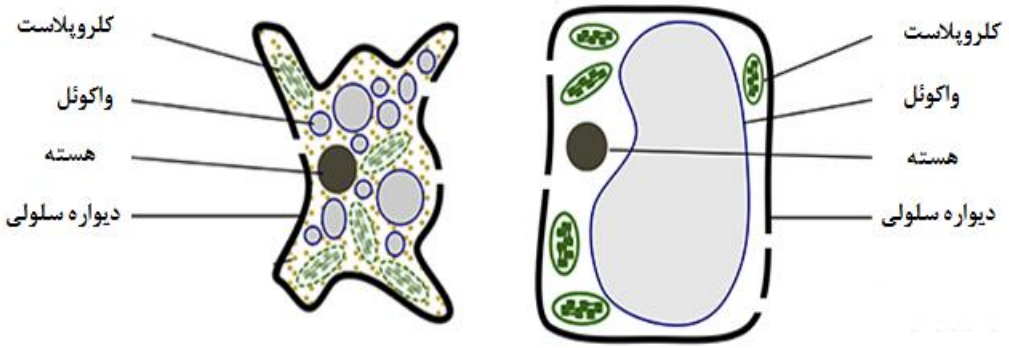
مقدمه

بافت‌های گیاهی تجمعی از سلول‌های استوانه‌ای یا منشوری نا منظم هستند که وظایف خاصی را در گیاهان به عهده دارند. تقریبا تمامی سلول های گیاهی دارای اجزای ساختمانی مشترکی هستند. دیواره سلولی که مختص سلول های گیاهی است تعیین کننده شکل، اندازه و سختی سلول بوده و به همراه غشای پلاسمایی که در قسمت داخلی آن واقع شده محتویات سلول را از بقیه سلول ها و محیط اطراف جدا می کنند. دیواره سلولی و غشای پلاسمایی نسبت به آب نفوذ پذیر 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 می باشد (Yadav and Singh, 2014). هنگامیکه غلظت سیال درون سلول افزایش می یابد آب جذب سلول می شود و اندازه سلول در اثر آماس بزرگ می شود و بر عکس زمانیکه غلظت محلول خارج سلول بیشتر از داخل سلول باشد آب از سلول خارج شده و سلول چروکیده می شود.

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 می گردد. این تغییرات به صورت چروکیدگی در محصول ظاهر می شوند. 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[1]سلولی قرار می گیرد (Karunasena *et al.*, 2015). در شکل (۱) طرحواره ای 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 می دهد که تاکید می کند 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 سلول های بزرگتر و بافت درونی دارای سلول های متراکم‌تری است(Gancarz and Konstankiewicz, 2007) که این ساختارها بر انتقال رطوبت با درون این سلول‌ها و از درون به بیرون تاثیر می گذارند. محصولات کشاورزی به‌طور 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 که خود تابعی از دمای محصول می باشد. همانطور که سطح رطوبت کاهش می یابد ساختار سلولی تغییر کرده و انتقال کاهش می یابد. در مجموع انتقال آب در بافت های مواد غذایی و محصولات کشاورزی پدیده پیچیده‌ای است.

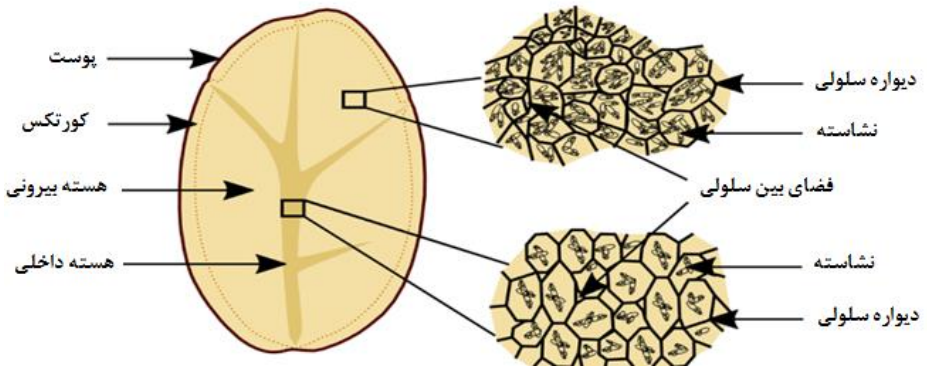
1 -Turgor Pressure



(ب) (الف)

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

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 می دهد که تاکید می کند 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 سلول های بزرگتر و بافت درونی دارای سلول های متراکم‌تری است(Gancarz and Konstankiewicz, 2007) که این ساختارها بر انتقال رطوبت با درون این سلول‌ها و از درون به بیرون تاثیر می گذارند. محصولات کشاورزی به‌طور 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 که خود تابعی از دمای محصول می باشد. همانطور که سطح رطوبت کاهش می یابد ساختار سلولی تغییر کرده و انتقال کاهش می یابد. در مجموع انتقال آب در بافت های مواد غذایی و محصولات کشاورزی پدیده پیچیده‌ای است.



شکل ۲- برشی از یک غده سیب زمینی که نشان می دهد سلول های مختلفی در قسمت های مختلف غده وجود دارند.

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. مدل‌های 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. مدل‌های چند فازی جامع‌تر هستند و بینش بهتری نسبت به مکانیسم‌های انتقال ارائه می‌کنند، زیرا می‌توانند پروفایل‌های 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 ویژگی‌ها و پدیده‌های 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 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(Aprajeeta *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 مویینگی برای مایع (آب) و مکانیسم های همرفت (جریان دارسی) در مدل خشک کردن در محیط متخلخل استفاده می‌شود(Turkan *et al.*, 2019). نیروهای محرک این نوع جریان‌ها، مانند

اختلاف فشار، غلظت و نیروهای موییننگی تحت تأثیر ماهیت متخلخل مواد غذایی قرار می گیرند(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 مدل-سازی محیط های متخلل 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 گسترده ای از مواد قابل استفاده است،که باعث صرفه جویی در زمان، هزینه و سایر منابع صرف شده برای آزمایش با نمونه های گیاهی واقعی می شود و همچنین نتایج دقیقی را ارائه می دهد که منجر به افزایش درک اساسی در مورد پدیده های مختلف مرتبط می شود. 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(Mudiyanselage *et al.*, 2017).

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 می شود. با این حال، تنها تعداد محدودی از مدل های عددی برای فرآوری مواد غذایی در دسترس است، که می‌توان آنها را به دو دسته کلی روش‌های مبتنی بر شبکه و روش‌های بدون شبکه[۲] تقسیم‌بندی کرد. روش‌های مبتنی بر شبکه مانند روش اجزا محدود[۳] (FEM) و روش تفاضل محدود[۴] (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(Mudiyanselage et al., 2017).

مدل‌سازی محیط‌های متخلخل

محیط متخلخل در سیستم‌های غذایی مقیاس های مختلفی را پوشش می دهد. به منظور مدل‌سازی فرآیندهای انتقال در سیستم‌های غذایی، می‌توان یک

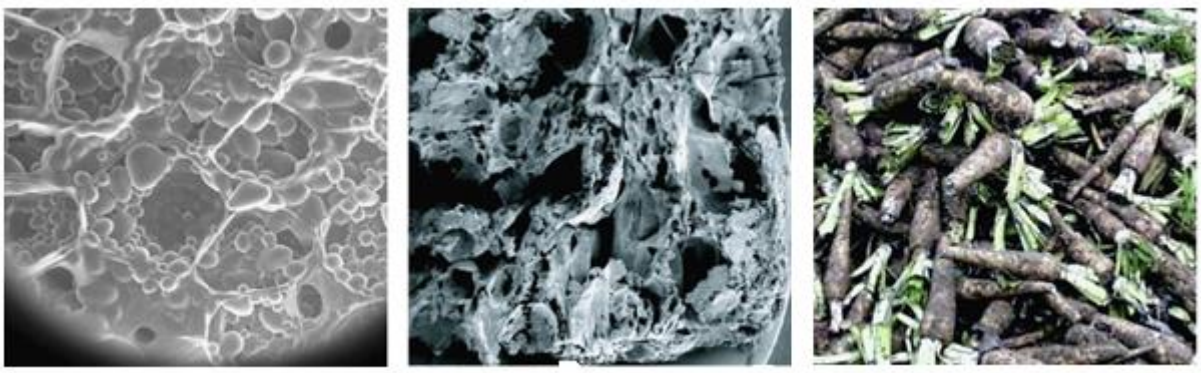
2 - Mesh free
3 - Finite Element Method
4 - Finite Difference Method

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 می شود که تعمیم جریان دارسی است. گروه دیگر شامل محیط هایی 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 دارسی استفاده می‌شود(Datta, 2007b):

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

کاربرد این‌گونه 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 می تواند 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 می دهد. 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 مزوسکوپیک و در سمت چپ در سطح میکروسکوپیک نشان داده شده است.



(الف) (ب) (ج)

شکل ۳- بکار گیری و بررسی اصول انتقال رطوبت در محیط متخلخل در سه مقیاس الف: معمولی ، ب: مزوسکوپیک، ج: میکروسکوپیک

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.

مکانیزم های 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). بحث های زیادی در مورد ایجاد یک مدل دقیق برای پیش بینی 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 سیستم های پیچیده‌ای که در آن چندین مکانیزم می تواند 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 فرآیندها 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 شدیدی در داده های مربوط به خواص مواد و انتقال مناسب برای توسعه مدل چند فازی وجود دارد. اگرچه محققان اخیراً شروع به توسعه یک مدل چند فازی برای فرآوری مواد غذایی کرده‌اند، مفروضات ساده‌سازی زیادی برای غلبه بر پیچیدگی‌های فرآیندها و عدم وجود خواص مواد مناسب مطرح شده است. در زیر فرآیندهایی که باعث انتقال رطوبت چند فازی در محیط های متخلخل می‌شوند مورد بحث قرار می‌گیرند:

۱-نفوذ

نفوذ[5] فرآیندی است که طی آن جرم در نتیجه گرادیان غلظت از یک قسمت سیستم به قسمت دیگر منتقل می شود. این فرآیند منجر به تعادل غلظت درون سیستم می شود 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 کمّی کرد. شار نفوذ Jm را می توان با قانون اول نفوذ فیک بیان کرد(Srikiatden & Roberts, 2007):

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

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

جریان با تغییر زمان t به $t + \partial t$ را می توان 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:

5 Diffusion

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

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 مویینگی[6] و نفوذ باینری.[7] نفوذ مویینگی فرآیند ناشی از کشش سطحی است که در تماس مایع و سطوح دیگر رخ می دهد. نفوذ مویینگی برای انتقال مایع در مدل سازی پدیده‌های انتقال استفاده می شود، نیرویی که مسئول این عمل است، نیروی مویینگی نامیده می شود که با جاذبه بین مولکول‌های مایع و ذرات جامد در محیط متخلخل تعریف می شود. علاوه بر این، افزایش مویینگی نتیجه اختلاف فشار سطحی است. این نیروهای مویینگی در علوم غذایی بسیار مهم هستند

زیرا مواد غذایی نمی‌توانند به طور کامل توسط نیروی گرانش تخلیه شومد. 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 جرکت 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 که نشان دهنده توانانیی گونه A برای نفوذ در محیط B است(Khan *et al.*, 2018).

۲– جریان تحت فشار:

یکی از دلایل انتقال در مواد دارای خلل و فرج جریان تحت فشار[8] می باشد. این جریان باعث حرکت حجمی در اثر اختلاف فشار می‌باشد. مایع و گاز (هوا یا بخار) می تواند توسط این مکانیزم داخل منافذ منتقل می‌شوند. 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 $(kg/m^2\ s)$، ρ_g چگالی گاز (kg/m^3) و μ_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 $(kg/m^2\ s)$، ρ_l چگالی مایع (kg/m^3) و μ_l ویسکوزیته دینامیکی مایع $(kg/m\ s)$ است.

۳– تبخیر

تبخیر[9] فرآیند تغییر فاز است که طی آن اتم‌ها یا مولکول‌ها در فاز مایع انرژی کافی برای ورود به

6 Capillary diffusion
7 - Binary diffusion
8 Pressure driven flow
9 Evaporation

فاز گاز به دست می‌آورند. در مورد فرآوری مواد غذایی، تبخیر نقش مهمی ایفا می کند زیرا مولکول های آب فقط به صورت بخار می توانند 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):

$$R_{evap} = K_{evap} \frac{\mathrm{M}_v}{RT} \left(p_{v,eq} - p_v\right) \quad (6)$$

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

٤- 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 ایده‌الی از بخار آب و هوا در نظر گرفته می‌شود.

٦- 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

ترموفیزیکی مناسب برای مدل‌سازی فرآیندها ضروری است. فشار مویینگی، 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 مدل های چند فازی پردازش مواد غذایی در سطح ماکروسکوپی ضروری است در زیر مورد بحث قرار می گیرد:

۱–نفوذپذیری

نفوذپذیری[1] 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 می توان 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 مویینگی می تواند 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 فازی برای سیستم‌های مختلف پردازش مواد غذایی، خاصیت نفوذ مویینگی 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:

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

1 - Permeability 0

که M_d و M_w 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 می کند و ممکن است به عنوان معیاری برای اصطکاک سیال در نظر گرفته شود. ویسکوزیته سیالات به طور قابل توجهی با دما و فشار تغییر می کند، 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 می آید:

$$\mu_W = \rho_W \mathrm{e}^{(-19.143+\frac{1540}{T})} \qquad (11)$$

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

که در آن μ_w و μ_g به ترتیب ویسکوزیته آب و گاز (kg/m s) و ρ_w چگالی آب (kg/m^3) 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 مدل‌سازی فرآیند غذایی، چگالی نقش مهمی در مطالعه 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 می شود.

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 می کند. یکی از راه های 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 می توان به صورت زیر نوشت(Khan *et al.*, 2018):

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

که در آن ρ_{app} و ρ_s به ترتیب چگالی ظاهری و چگالی واقعی هستند.

۵-تخلخل

تخلخل[11] 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 متخلل دارای رطوبت یک رابطه معکوس بین تخلخل و میزان رطوبت نشان می دهد، به عنوان مثال، اگر تخلخل افزایش یابد، میزان رطوبت کاهش می یابد. تعیین

11-Porosity

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

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

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

۶–رسانایی حرارتی

رسانایی حرارتی[۱۲] یکی از مهمترین خواص فیزیکی مواد غذایی است که برای تجزیه و تحلیل پردازش مواد غذایی استفاده می شود که در آن انتقال گرما و جرم به طور همزمان اتفاق می افتد. 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 می یابد. یافتن یک رابطه خطی بین هدایت حرارتی و رطوبت معمول است. این نوع همبستگی توسط دیگران بررسی شده است. هنگامی که چنین ویژگی هایی از مواد غذایی برای تجزیه و تحلیل فرآیندهای غذایی مورد نیاز است، عملی ترین راه استفاده از مقادیر پیش بینی شده از مدل های نظری یا تجربی است.

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

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

که در آن $k_{th,eff}$، $k_{th,s}$، $k_{th,air}$ و $k_{th,w}$ رسانایی گرمایی موثر $(W/m\ K)$ به ترتیب برای جامد، هوا و آب هستند. X کسر جرمی آب مواد غذایی است. T_{ref} و $k_{th,w}$ 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 گسترده ای از نتایج برای مدل های تک‌فازی و چند فازی وجود دارد که می‌تواند به دلیل خواص مواد و شرایط مختلفی باشد، که محققان مختلف در مطالعات خود در نظر گرفته اند. بنابراین، بدست آوردن یک ایده کلی از خروجی مدل ها 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 می گیرد. در روش کد نویسی که روشی برای حل عددی مسائل برای اهداف تحقیقاتی است،

12- Thermal conductivity

توسعه کد از ابتدا ارجح است، اما معمولاً بسیار وقت گیر است. در مورد مدل های فرآوری مواد غذایی، محققان مختلف از سیستم کدنویسی برای حل معادلات استفاده کردند. برای کدنویسی می توان از زبان های 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 COMSOL Multiphysics، FLUENT، ANSYS، CFX، STAR-CD، PHOENICS و ADINA توسعه یافته‌اند. از این میان، COMSOL Multiphysics یک نرم افزار چند منظوره است که بر اساس روش های عددی پیشرفته، برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی مسائل مبتنی بر فیزیک است. اخیراً اکثر محققان از این نرم افزار برای پیاده‌سازی کارآمد مدل خود در سیستم های 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 تحلیل المان محدود است که برای مسائل انتقال حرارت چندفیزیکی همراه با تحلیل ساختاری استفاده می شود.

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 می آیند. در مراحل اولیه از دست دادن رطوبت، سطح رطوبت به دلیل نفوذ مووینگی زیاد در رطوبت اولیه بالا به طور یکنواخت کاهش می یابد. این معادل یک وضعیت حرکت حجمی در انتقال حرارت است. عدم یکنواختی در پروفایل رطوبت زمانی شروع به پیشرفت می کند که مقدار رطوبت در نزدیکی سطح تا حدی کاهش یابد که باعث کاهش قابل توجه نفوذ مووینگی می‌شود(Datta, 2007b). در محصولات با رطوبت کم مقدار رطوبت سطح به دلیل افزایش سریع دمای سطح، سریع کاهش می یابد. با این حال، رطوبت داخل به آرامی کاهش می یابد زیرا نفوذ مویرگی در این مناطق بسیار پایین است(Ni *et al.*, 1999). با خشک شدن سطح، ناحیه تبخیر به داخل حرکت می کند. با این حال، با ضخیم تر شدن پوسته و رسانایی حرارتی پایین آن سرعت انتقال حرارت کاهش می یابد.

علاوه بر رطوبت، نمودارهای توزیع فشار درون بافت گیاهی، از دیگر خروجی های 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 می گذارد. آگاهی از نرخ کاهش فشار و توزیع فشار به درک

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

برای تعیین دقت پیش‌بینی مدل‌ها و صحت سنجی حل معادلات حاکم با روش های عددی، محققان از چندین شاخص آماری استفاده می‌کنند که امکان ارزیابی مدل را با داده‌های تجربی فراهم می‌کند. مربع کای (χ^2) و ضریب تبیین (R^2) اغلب مورد استفاده قرار می‌گیرند. 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 می‌شود، زمانی که $p<۱۰٪$ باشد، نشان می‌دهد 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 منحنی‌های 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 می دهد توصیه نمی شود. برای مثال، R^2 و χ^2 فقط دقت مدل را توصیف می کنند.

نتیجه‌گیری

محصولات کشاورزی به‌طور طبیعی دارای مقدار زیادی آب می‌باشند 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 مدل‌سازی چگونگی انتقال رطوبت درون محصول به نگهداری بیشتر محصولات کمک شایان توجهی می نماید. مدل‌های استفاده شده در منابع برای بررسی انتقال رطوبت اغلب سه مدل نفوذ شامل نفوذ مویینگی 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 می‌گذارند. امروزه تکنیک‌های حل عددی معادلات انتقال رطوبت با استفاده از کدنویسی یا بهره گیری از نرم افزارهای تجاری برای بررسی انتقال حرارت درون بافت‌های متخلخل گیاهی انجام می‌شود.

REFRENCES

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[a]. 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[b]. 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[a]. 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[b]. 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.

.

Sustainable Agricultural Science Research /Vol. 1/No. 3/Fall 2021/P: 50 -66

https://www.sarj.iauk.ac.ir

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

Fatemeh Mozafari Ghorba[1], Mohammadmehdi Maharlooei[2*], Ahmad Ghazanfari Moghaddam[3]

[1]PhD student Biosystems Engineering Department of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

[2] Associate Professor, Biosystems Engineering Department of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

[3] 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