**بررسی مکانیزم**

**فاطمه مظفری غربا1،**

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

2- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک

\* ايميل نویسنده مسئول: maharlooei@uk.ac.ir

(تاریخ دریافت: 10/9/1400- تاريخ پذيرش: 30/9/1400)

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 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.**

**واژه‏هاي کليدي**: **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 تاثر نرخ کاهش رطوبت، دمای محصول و محیط و فشار تورم[[1]](#footnote-1) سلولی قرار می گیرد (Karunasena *et al.,* 2015). در شکل (1) 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 (2) 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. می یابد. در مجموع انتقال آب در بافت های مواد غذایی و محصولات کشاورزی پدیده پیچیده‏ای است.



 (الف) (ب)

**شکل 1- 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

می­شود(Turkan *et al.,* 2019). نیروهای محرک این نوع جریان­ها، مانند اختلاف فشار، غلظت و نیروهای مویینگی 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 مدل­سازی 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[[2]](#footnote-2) تقسیم­بندی کرد. روش­های مبتنی بر شبکه مانند روش‌ اجزا محدود[[3]](#footnote-3) (FEM) و روش‌ تفاضل محدود[[4]](#footnote-4) (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 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 (3) 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 3 در قسمت وسط انتقال رطوبت در سطح مزوسکوپیک و در سمت چپ در سطح میکروسکوپیک نشان داده شده است.



 (الف) (ب) (ج)

**شکل 3- 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:

**1-نفوذ**

نفوذ[[5]](#footnote-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):

که D ضریب نفوذ و –∂C / ∂x گرادیان غلظت است.

 جریان با تغییر زمان t به t + ∂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 + ∂x به شرح زیر بیان کرد:

جایگزینی شار جرمی بیان شده در معادله (1) در (2) منجر به قانون دوم نفوذ فیک می شود:

در حین انتقال آب در محیط متخلخل، دو نوع نفوذ در مورد مدلسازی چند فازی باید در نظر گرفته شود: نفوذ مویینگی[[6]](#footnote-6) و نفوذ باینری[[7]](#footnote-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).

2- جریان تحت فشار:

یکی از دلایل انتقال در مواد دارای خلل و فرج جریان تحت فشار[[8]](#footnote-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):

که در آن n شار جرمی بخار ناشی از اثر فشار گاز (kg/m2 s)، 𝜌g چگالی گاز (kg/m3) و μg ویسکوزیته دینامیکی گاز (kg/m s) است و برای جریان تحت فشار برای مایع:

که n شار جرم ناشی از اثر فشار سیال مایع (kg/m2 s)، 𝜌l چگالی مایع (kg/m3) و μl ویسکوزیته دینامیکی مایع (kg/m s) است.

**3- تبخیر**

تبخیر[[9]](#footnote-9) فرآیند تغییر فاز است که طی آن اتم‌ها یا مولکول‌ها در فاز مایع انرژی کافی برای ورود به 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):

در اینجا Mv جرم مولی بخار (kg mol-1)، pv,eq فشار بخار تعادلی (Pa)، pv فشار بخار (Pa) و Kevap ثابت تبخیر (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 می شود به شرح زیر است(Khan *et al.,* 2018; Kumar *et* *al.*, 2018):

1. 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.
2. تمام فازها (جامد، مایع و گازها) پیوسته در نظر گرفته می­شوند.
3. 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.
4. 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.
5. فاز گاز ترکیب ایده­الی از بخار آب و هوا در نظر گرفته می­شود.
6. در بیشتر موارد، اثر گرانش نادیده گرفته شد، زیرا اثر جاذبه روی یک نمونه غذا در مقایسه با اثر مویرگی بسیار ضعیف است.
7. به دلیل نبود اطلاعات دقیق، خواص مواد معمولاً ایزوتروپیک در نظر گرفته می‏شود.
8. 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:

**1-نفوذپذیری**

نفوذپذیری[[10]](#footnote-10) 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):

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).

**2-نفوذ موئینگی**

مایع درون مواد غذایی به دلیل تفاوت در عملکرد مویینگی می تواند از مواد با غلظت بالاتر به غلظت

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).

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

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

**3-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 11 و 12 بر حسب دما به صورت زیر بدست می آید:

که در آن μw و μg به ترتیب ویسکوزیته آب و گاز (kg/m s) و 𝜌w چگالی آب (kg/m3) است.

**4-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):

که در آن 𝜌app و 𝜌s به ترتیب چگالی ظاهری و چگالی واقعی هستند.

**5-تخلخل**

تخلخل[[11]](#footnote-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 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:



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

**6-رسانایی حرارتی**

رسانایی حرارتی[[12]](#footnote-12) 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 %15 بیشتر از مقادیر تجربی ارائه می‌دهد استفاده کرد:

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



که در آنkth,eff ، kth,s، kth,air و kth,w رسانایی گرمایی موثر (W/m K) به ترتیب برای جامد، هوا و آب هستند.X کسر جرمی آب مواد غذایی است. Tref و kth,w به ترتیب دما و رسانایی مرجع در صفر درجه سانتی‏گراد هستند.

**حل معادلات**

هدف از حل معادلات رسیدن به خروجی­هایی است که برای محقیقین 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، 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. نرم­افزارFLUENT 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 خروجی­های 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 مویینگی 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 مویینگی 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 (χ2) 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 %10>p 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 χ2فقط 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. 2006a. 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. 2006b. 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. 2007a. 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. 2007b. 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**

**Fatemeh Mozafari Ghorba1, Mohammadmehdi**

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

2 Associate Professor, Biosystems Engineering Department

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, 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

1. -Turgor Pressure [↑](#footnote-ref-1)
2. - Mesh free [↑](#footnote-ref-2)
3. - Finite Element Method [↑](#footnote-ref-3)
4. - Finite Difference Method [↑](#footnote-ref-4)
5. - Diffusion [↑](#footnote-ref-5)
6. - Capillary diffusion [↑](#footnote-ref-6)
7. - Binary diffusion [↑](#footnote-ref-7)
8. - Pressure driven flow [↑](#footnote-ref-8)
9. - Evaporation [↑](#footnote-ref-9)
10. - Permeability [↑](#footnote-ref-10)
11. - Porosity [↑](#footnote-ref-11)
12. - Thermal conductivity [↑](#footnote-ref-12)