

ادغام خشک کن جابجایی و تشعشعی جهت کاهش زمان خشک شدن

حسن پهلوانزاده^{a*}، سیما حدیدی^b، محمدرضا قاسمی^c

^aاستاد دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی شیمی، تهران، ایران
^bکارشناس ارشد دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی شیمی، تهران، ایران
^cاستادیار دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی شیمی، تهران، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۳/۲۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۱۲/۱۲

۳۹

چکیده

مقدمه: سبزیجات و میوه ها به دلیل مقدار رطوبت بالایشان بسیار در معرض فاسد شدن قرار می گیرند. یکی از مشکلات اساسی صنایع وابسته به کشاورزی در ایران، افزایش تلفات محصول در مرحله خشک کردن بدلیل طولانی بودن زمان آن است.

مواد و روش ها: یکی از روش های معمول در خشک کردن مواد غذایی مانند میوه جات، خشک کردن به روش جابجایی است. در این تحقیق برای مدلسازی از مدل فیلم نازک برای یک خشک کن جابجایی پیوسته استفاده شده است و علاوه بر بدست آوردن پروفایل مقدار رطوبت جسم در طول خشک شدن، زمان خشک شدن نیز محاسبه گردیده است. بمنظور مدلسازی، معادلات انتقال جرم و حرارت به طور همزمان به کمک روش عددی با کمک نرم افزار MATLAB حل شده است. سپس نتایج حاصل از مدلسازی با نتایج آزمایشگاهی موجود در مراجع مقایسه گردید.

یافته ها: همچنین اثر تغییرات دمای هوا در محدوده 30°C تا 60°C و تغییرات سرعت در محدوده 1 m/sec تا 3 m/sec بر زمان خشک شدن نیز بررسی شده است. نتایج نشان داد که میزان رطوبت با افزایش دما و سرعت سریعتر کاهش یافته و زمان خشک شدن کم می شود.

نتیجه گیری: جهت افزایش راندمان حرارتی، خشک کن جابجایی و تشعشعی در هم ادغام شده که نتیجه آن کاهش زمان خشک شدن می باشد. نتایج نشان می دهد که با ادغام این دو روش تا ۵۸٪ زمان خشک شدن میوه کاهش می یابد.

واژه های کلیدی: جابجایی، خشک کن، زمان خشک کردن، مادون قرمز، مدلسازی

مقدمه

امروزه یکی از مشکلات اساسی صنایع وابسته به کشاورزی در ایران، افزایش تلفات محصول در مرحله خشک کردن بدلیل طولانی بودن زمان آن است و در نتیجه مشکلاتی را در بخش ذخیره کردن محصول و عملیات پس از برداشت بوجود می آورد. سبزیجات و میوه‌ها به دلیل مقدار رطوبت بالایشان بسیار در معرض فاسد شدن قرار می گیرند، (Simal *et al.*, 1997) بنابراین حذف مقداری از رطوبت به اندازه مطلوب برای جلوگیری از رشد کپک و فعالیت باکتری‌ها ضروری است. (Karim and Hawlader, 2005) عملیات خشک کردن روشی است که بطور گسترده ای برای محافظت و نگهداری مواد غذایی بویژه میوه‌ها استفاده می‌شود. خشک کردن مواد غذایی علاوه بر اینکه باعث اصلاحات آنزیمی می شود مزایای دیگری نیز دارد که از آن جمله: عدم نیاز به سیستم های خنک کننده گران برای نگه داری مواد، سهولت در حمل و نقل و ذخیره مواد بخاطر کاهش ابعاد آنها، زمان نگهداری طولانی مواد غذایی و داشتن محصولات متنوع با ترکیب و مزه متفاوت (Earle, 1998, Hayashi, 1989, Sharma *et al.*, 2005, Akpinar *et al.*, 2003a). همچنین کاهش فعالیت آب در ماده مرطوب، بسیاری از واکنش‌های نامطلوب را کند می‌کند (Ibarz *et al.*, 2000). با استفاده از روشهای جدید و کاهش زمان خشک کردن، می‌توان علاوه بر کاهش انرژی مصرفی، تلفات را نیز کاهش داد. در گذشته میوه‌ها و سبزیجات معمولاً توسط نور آفتاب خشک می‌شدند. از جمله مشکلات این روش کندی فرآیند، در معرض آلودگی قرار گرفتن، قابل پیش بینی نبودن شرایط آب و هوایی و نیاز به نیروی کار دستی بوده است (Doymz, 2004, Kostaropoulos and Saravacos, 1995). در عصر جدید یکی از روش‌های خشک کردن، خشک کردن از طریق مکانیزم جابجایی است. در این روش، گرما از طریق وزیدن هوای گرم شده به ماده منتقل میشود. مقاومت‌های انتقال جرم و حرارتی ماده در لایه مرزی مابین جسم و هوای گرم بوجود می‌آیند و مقدار آنها بستگی به سرعت هوا و یا در حالت کلی‌تر بستگی به عدد رینولدز دارد، از طرف دیگر این مقاومت‌ها

ادغام خشک کن جابجایی و تشعشعی جهت کاهش زمان خشک شدن

تحت اثر قوی سینتیک تبخیر آب هستند (Lewicki, 1998). در روش جابجایی، زمان خشک شدن طولانی بوده و باعث اتلاف مواد مغذی ماده و همین طور کاهش کیفیت محصول میشود. یکی از علت های اصلی کند بودن فرآیند خشک شدن با هوای داغ، هدایت حرارتی پایین و سخت شدن پوسته (لایه بیرونی ماده) در طول خشک شدن است. ابتدا گرما باید به کمک هدایت به داخل ماده منتقل شود، بنابراین لایه های بیرونی زودتر خشک شده و پوسته کم کم سخت می‌شود. با پیشروی خشک شدن، رطوبت از لایه های درونی کمتر نفوذ میکند و این پدیده، نفوذ رطوبت به سطح را محدود می کند. (Afzal *et al.*, 1999). پیش از این روش های ابتکاری که سرعت خشک کردن را افزایش دهد و کیفیت محصول را نیز بالا ببرد بسیار مورد توجه قرار گرفته است. (Mongpraneet *et al.*, 2002)

یکی از راه‌های کوتاه تر کردن زمان خشک شدن و جلوگیری از مشکلات روش جابجایی، فراهم کردن حرارت و گرما توسط تشعشع مادون قرمز است. در خشک کردن با منبع تشعشعی، گرما در درون ماده تولید شده و در منطقه با رطوبت بیشتر متمرکز می‌شود، بنابراین با افزایش فشار بخار در این منطقه، رطوبت به سمت لایه های بیرونی که فشار بخار کمتر است می رود، از اینرو مشکلات مربوط به هدایت گرمایی و خشک شدن پوسته کاهش میابد (Afzal *et al.*, 1999). این روش مخصوصاً برای خشک کردن لایه های نازک ماده با سطح بزرگ (Thin Layer) بسیار مناسب است (Sandu, 1986).

Karim and Hawlader (۲۰۰۵) مدل ریاضی را که شامل دو مدل Material و Equipment است را برای حل معادلات انتقال حرارت و جرم در یک خشک کن جابجایی برای میوه های گرمسیری پیشنهاد داده اند. مدل Material پدیده انقباض حجمی ماده در طول خشک شدن و تابعیت آن با نفوذپذیری موثر را در نظر می گیرد، این مدل قادر به پیش بینی توزیع رطوبت و دما در داخل ماده است. پدیده انقباض حجمی، پدیده ای است که با کاهش مقدار رطوبت جسم، کاهش حجم جسم را در پی دارد. برای بسیاری از مواد بیولوژیکی بخاطر این پدیده در منحنی خشک شدن، دوره ثابت خشک شدن^۱، خود را

¹ Constant Rate

Nowak and Lewiki (۲۰۰۴) مقایسه‌ای بین خشک شدن جابجایی و مادون قرمز بر روی سیب انجام دادند و نشان دادند که وقتی از انرژی مادون قرمز برای خشک کردن استفاده می‌کنیم زمان پروسه تا ۵۰٪ کاهش می‌یابد. بدست آوردن زمان خشک شدن و پارامترهای موثر بر روی آن را می‌توان قبل از ساخت هر خشک کنی با مدلسازی و موازنه جرم و حرارت شبیه سازی کرد. هدف از این مقاله مدلسازی خشک کن جابجایی پیوسته با کمک منحنی مشخصه خشک شدن^۳، بدست آوردن تغییرات مقدار رطوبت ماده در طول خشک شدن و اثر پارامترهای خارجی^۴ روی زمان خشک شدن و بررسی اثر تشعشع روی زمان خشک شدن و کاهش مصرف انرژی در یک خشک کن ترکیبی جابجایی و تشعشعی^۵ است.

مواد و روش‌ها

- مکانیزم خشک کن

خشک کن جابجایی: خشک کن شبیه‌سازی شده یک خشک کن پیوسته^۶ با مکانیزم جابجایی است. با افزایش نیاز به محصولات خشک شونده، استفاده از خشک کن‌های پیوسته همچون خشک کن‌های نوار نقاله‌ای و بستر متحرک و پاششی بسیار مورد استفاده قرار گرفته است. ماده بصورت جریان همسو با عامل خشک کننده (هوا) قرار می‌گیرد، ماده ای که در معرض هوای داغ قرار گرفته به صورت یک فیلم نازک از میوه گرمسیری فرض شده است. شکل ۱ شمای کلی خشک کن جابجایی را نشان می‌دهد. ماده رطوبت سطحی خودش را در اثر گرفتن گرمای منتقل شده با مکانیزم جابجایی از دست می‌دهد تا این که به مقدار رطوبت بحرانی اش برسد، پس از آن رطوبت داخلی ماده در اثر نفوذ به سطح ماده رسیده و با گرفتن گرمای مورد نیاز برای تبخیرش به هوا منتقل می‌شود. در این ناحیه دبی خشک شدن توسط شرایط داخلی یعنی انتقال رطوبت در داخل ماده کنترل می‌شود که بستگی به تغییرات غلظت رطوبت دارد.

خشک کن ترکیبی (جابجایی - تشعشعی):

خشک کن ترکیبی فرآیند خشک کردن را از طریق ترکیب دو مکانیزم جابجایی و تشعشعی برای فراهم کردن گرمای

نشان نمی‌دهد. از طرف دیگر مدل Equipment فرایند انتقال در طول خشک کن را بررسی می‌کند و رطوبت و دمای هوا را بطور همزمان در هر نقطه از خشک کن پیش بینی می‌کند. Queiroz and Nebra (۲۰۰۱) بر روی مدل‌های مختلف نفوذ در خشک کردن موز تحقیق کردند و بهترین نتایج آزمایشگاهی را با شرایط ضریب نفوذ ثابت و لحاظ نکردن انقباض حجمی بدست آوردند.

Guine و همکاران (۲۰۰۷) مدل نفوذ را برای بررسی رفتار خشک شدن گلابی در یک خشک کن جابجایی پیوسته، با لحاظ کردن تغییرات مشخصات گلابی در طول خشک شدن، با استفاده از قانون دوم فیک^۱ ارائه دادند. Lacerda و همکاران (۲۰۰۵) برای حل معادلات انتقال جرم و حرارت بین هوا و دانه‌های سویا از مدل دوفازی استفاده کردند.

Dosmorieux و همکاران (۲۰۰۸) مدل‌سازی را بر مبنای منحنی مشخصه خشک شدن و پدیده انقباض حجمی، برای خشک کردن انبه ارائه دادند و اثر پارامترهای بیرونی چون دمای هوا، رطوبت هوا، میزان دبی هوا و همین طور ابعاد ماده خشک شونده را بر روی زمان خشک شدن بررسی کرده‌اند.

Afzal و همکاران (۱۹۹۹) بر روی خشک کردن دانه‌های جو با مکانیزم ترکیبی جابجایی و مادون قرمز FIR^۲ تحقیق کردند و با نتایج آزمایشگاهی نشان دادند که استفاده از مکانیزم ترکیبی تشعشعی و جابجایی در مقایسه با مکانیزم جابجایی میزان خشک شدن را بالا برده، زمان خشک شدن و مصرف انرژی را کاهش می‌دهد. یکی دیگر از پارامترهای مورد بررسی کیفیت دانه‌های جو بود که کیفیت آن با افزایش شدت تشعشع کاهش یافت.

Hebbar و همکاران (۲۰۰۴) ترکیب‌های مختلف خشک کردن جابجایی و تشعشعی را در فرآیند مواد غذایی بررسی کردند، در خشک کردن ترکیبی در مقایسه با هوای داغ، زمان فرآیند ۴۸٪ و مصرف انرژی ۶۳٪ کاهش یافت، در عین حال کیفیت محصول خشک شده از نظر رنگ و سخت شدن پوسته در مکانیزم ترکیبی خیلی بهتر از مکانیزم خشک شدن با تشعشع بود.

¹ Second Fickian Law

² Far Infrared Radiation

³ CDC (Characteristic drying curve)

⁴ External Parameters

⁵ FIR-Convective

⁶ Continuous Dryer

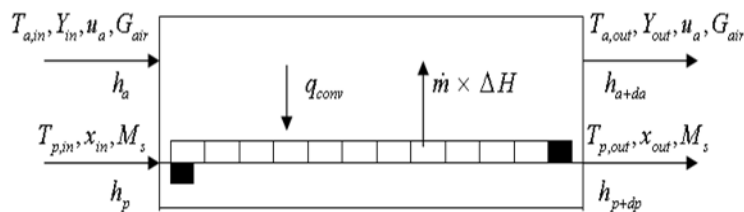
می‌باشند (Sandu, 1986). آزمایشات انجام گرفته در مراجع نشان می‌دهد که نفوذ اشعه به ماده در حال خشک شدن با فاصله فیما بین منبع تشعشعی و جسم رابطه معکوس دارند، در حقیقت راندمان منبع تشعشعی با افزایش فاصله بین منبع و جسم در حال خشک شدن کاهش می‌یابد. نتایج آزمایشات بهترین راندمان را در فاصله ۱۰ سانتیمتر نشان می‌دهد (Mongpranet *et al.*, 2002; Hebbbar *et al.*, 2004; Nowak and Lewiki, 2004). همین‌طور فلاکس تبخیر آب از سطح سیب (ماده خشک شونده) تحت تاثیر سرعت هواست و با کاهش آن، افزایش یافته است (Nowak & Lewiki, 2004).

مدل‌سازی خشک کن

خشک کن جابجایی: خشک کن جابجایی موردنظر با کمک مدل لایه نازک^۱ با استفاده از تابع مشخصه و منحنی های رطوبت تعادلی برای ماده مرطوب شبیه‌سازی می‌شود. فرضیات بکار رفته در مدل‌سازی عبارتند از:

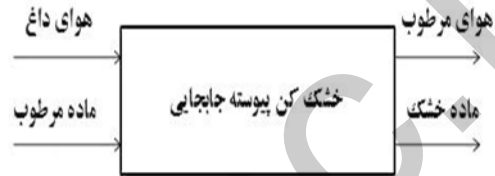
۱. دما و رطوبت نسبی هوا در طول خشک کن یکسان است.

۲. مشخصات ترموفیزیکی هوا ثابت است.
۳. سرعت هوا در محفظه خشک کن ثابت باشد.
۴. انتقال حرارت تشعشعی مواد و پدیده انقباض حجمی مواد ناچیز و قابل صرفنظر است.
۵. از اتلاف گرمایی صرفنظر شود.
۶. مشخصات ترموفیزیکی ماده نیز در طول خشک شدن ثابت باشد.
۷. دمای داخل ماده یکسان فرض شده و برابر دمای سطح ماده است.
۸. شرایط ورودی در ورودی خشک کن برای تمام محصول یکسان است.

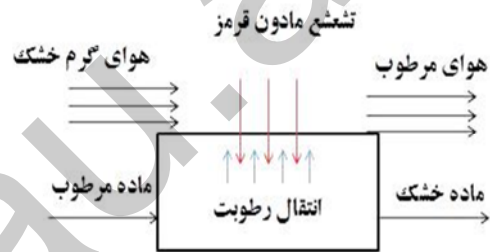


شکل ۳- قسمتی از خشک کن جابجایی که موازنه جرم و حرارت برای آن اعمال شده است.

مورد نیاز جهت خشک کردن جسم انجام می‌دهد. شکل ۲ شمای کلی خشک کن ترکیبی را نشان می‌دهد. وقتی مواد در معرض تشعشع مادون قرمز قرار می‌گیرد، تشعشعات به سطح ماده برخورد کرده و در آن نفوذ می‌کند. ارتعاشات مولکولی به خاطر جذب این تشعشعات افزایش یافته و بطور همزمان هم در سطح ماده و هم در لایه های داخلی ایجاد گرما می‌کند، این گرما میزان حرکت رطوبت به سمت سطح ماده را افزایش می‌دهد.



شکل ۱- شمای خشک کن جابجایی



شکل ۲- شمای خشک کن ترکیبی

راندمان هر سیستم بستگی به نوع منبع تشعشعی، فاصله بین منبع ساطع کننده و سطح جسم خشک شونده و همچنین سرعت هوا در خشک کن ترکیبی دارد. از آنجائیکه انرژی تشعشعی زمانی به گرما تبدیل می‌شود که این تشعشع توسط ماده خشک شونده جذب گردد، لذا انتخاب منبعی که انتشار امواجش در محدوده بیشترین میزان جذب توسط سطح جسم قرار دارد، پارامتر بسیار مهمی است. مطالعاتی که روی جذب اشعه مادون قرمز توسط مواد غذایی انجام گرفته است نشان می‌دهد که مواد غذایی قویترین میزان جذب را در محدوده ۲/۵ تا ۳ میکرو متر دارا

¹ Thin layer model

در این معادله $c_{p,v}$ و $c_{p,da}$ به ترتیب گرمای مخصوص هوای خشک و بخار است. $T_{a,out}$ و $T_{a,in}$ بترتیب دمای هوای ورودی و خروجی به حجم مورد نظر هستند.

محاسبه نرخ تبخیر \dot{m} : فلاکس جرمی آب تبخیرشده مقدار رطوبتی است که از واحد سطح جسم در واحد زمان تبخیر می‌شود و تحت تاثیر دو فاز خشک شدن است:

$$\dot{m} = k \cdot \rho_{air} \cdot (Y_{eq} - Y) \cdot f(\phi) \quad (5)$$

Y_{eq} مقدار رطوبت تعادلی، ρ_{air} جرم حجمی هوا و Y_{eq} رطوبت تعادلی است که از رابطه (۶) برای محاسبه آن استفاده می‌شود.

$$Y_{eq} = 0.622 \frac{P_w^{sat}}{P_t - P_w^{sat}} \quad (6)$$

که P_t فشار کل است و P_w^{sat} فشار بخار اشباع آب است که از رابطه آنتوان، معادله (۷)، میتوان P_w^{sat} که تابعی از دمای سطح است را بدست آورد.

(۷)

$$\ln(P_w^{sat}) = 18.3036 - \frac{3816.44}{T_p - 46.13}$$

که در آن دمای ماده بر حسب کلون است و فشار حاصل از این رابطه بر حسب $mmHg$ میباشد. در معادله (۵) ضریب مقاومت انتقال خارجی جسم توسط k مشخص شده که در فاز اول خشک شدن (Constant Rate) عامل کنترل کننده خشک شدن است و پس از آن ضریب مقاومت داخلی نیز که توسط تابع $f(\phi)$ مشخص شده، انتقال جرم را در فاز نزولی خشک شدن محدود می‌کند. $f(\phi)$ تابع مشخصه‌ای است که نسبت میزان خشک شدن مرحله دوم به مرحله اول را نشان می‌دهد. ضریب انتقال جرم جابجایی با استفاده از آنالوژی انتقال جرم و حرارت در رابطه (۸) ارائه شده است (Incropera and DeWitt, 1996).

(۸)

$$\frac{h}{k} = \rho_{air} \cdot c_{p,a} \cdot Le^{\frac{2}{3}}$$

Le عدد بدون بعد لوییس و در معادله (۹) ارائه شده است:

$$Le = \frac{K}{D_m} \quad (9)$$

به منظور مدل‌سازی، ابتدا لایه نازکی از جسم در خشک‌کن مطابق شکل ۳ در نظر گرفته شده سپس موازنه جرم و حرارت برای المان مورد نظر در معادلات (۱) تا (۴) نوشته شده است:

موازنه جرم برای فاز ماده

$$M_s \cdot \left(\frac{dx}{dt}\right) = -\dot{m} \cdot a_c \quad (1)$$

در این معادله M_s جرم ماده خشک شده بر واحد سطح پایه است. x مقدار رطوبت جسم خشک شونده بر مبنای خشک است. \dot{m} فلاکس جرمی آب تبخیر شده است و a_c سطح انتقال هوا با جسم به سطح پایه یا همان ضریب تصحیح سطح است.

موازنه حرارت برای فاز ماده

(۲)

$$M_s \cdot (c_{p,dm} + x \cdot c_{p,w}) \cdot \left(\frac{dT_p}{dt}\right) = -\dot{m} \cdot a_c \cdot \Delta H + h \cdot a_c \cdot (T_{a,in} - T_p)$$

در این معادله $c_{p,w}$ و $c_{p,dm}$ به ترتیب گرمای مخصوص ماده خشک و آب مایع است. T_a و T_p به ترتیب دمای ماده و دمای هوا (عامل خشک کننده) است. ΔH گرمای نهان تبخیر آب است و h ضریب انتقال حرارت جابجایی است.

موازنه رطوبت برای فاز هوا

$$G_{air} \cdot (Y_{out} - Y_{in}) = \dot{m} \cdot a_c \quad (3)$$

رطوبت هوا در مقطع طولی خشک کن، بخاطر آب تبخیر شده از جسم تغییر میکند. در این معادله G_{air} میزان دبی هوای ورودی به خشک‌کن است و Y مقدار رطوبت مطلق هواست. Y_{out} و Y_{in} نیز بترتیب مقدار رطوبت مطلق هوای ورودی و خروجی به حجم در نظر گرفته شده است.

موازنه حرارتی برای فاز هوا

(۴)

$$M_s \cdot (c_{p,da} + Y_{in} \cdot c_{p,v}) \cdot (T_{a,out} - T_{a,in}) = h \cdot a_c \cdot (T_p - T_{a,in})$$

تغییر آنتالپی هوا در مقطع طولی خشک‌کن ناشی از تبادل انرژی حرارتی بین هوا و جسم توسط رطوبت است.

ادغام خشک کن جابجایی و تشعشعی جهت کاهش زمان خشک شدن

(۱۲)

$$\phi = \frac{x - x_{eq}}{x_{cr} - x_{eq}}$$

وتابع مشخصه در معادله (۱۳) ارائه شده است:

(۱۳)

$$f(\phi) = \phi^n$$

مقادیر x_{cr} و n به کمک آزمایش در یک لوپ بسته خشک کن آزمایشگاهی جابجایی قابل محاسبه هستند. (Desmorieux et al., 2008) این آزمایش را برای انبه انجام داده و نتایج آزمایشهای انجام شده در جدول ۱ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار رطوبت بحرانی حول مقدار اولیه رطوبت تغییر می‌کند و مقدار n نیز بین اعداد ۰/۶۶ و ۱/۲۸ متغیر است که این تغییر بعلا متغیر بودن نوع ترکیب و میزان خام یا رسیده بودن ماده مورد آزمایش است. با این حال برای خشک شدن آرام، این عدد نزدیک به ۱ است، بنابراین در این مدل این مقدار ۱ لحاظ شده است.

بمنظور محاسبه مقدار رطوبت تعادلی x_{eq} از منحنی جذب همدمما از مطالعات (Guerrero-Beltran, 2000) استفاده شده است (Myara and Sablani, 2001). نشان دادند که مقدار رطوبت تعادلی در محدوده دمایی °C (۶۰-۱۵) خیلی تغییر نمی‌کند. این مقدار به کمک چند جمله ای در رابطه (۱۴) ارائه شده است:

(۱۴)

$$x_{eq} = 3.6RH^4 - 2.12RH^3 - 0.28RH^2 + 0.37RH - 0.03$$

با توجه به آزمایش‌های انجام گرفته در شرایط مرزی، به این مسئله اشاره دارد که تابع مشخصه با شرایط مرزی که در معادله (۱۵) ارائه شده است مطابقت دارد:

در این رابطه K و D_m بترتیب نفوذ حرارتی هوا و ضریب نفوذ رطوبت در هواست. ضریب انتقال حرارت نیز برای جریان آرام از رابطه (۱۰) (Mills, 1995) با یافتن عدد ناسلت حاصل شده است:

(۱۰)

$$Nu = \frac{hL}{\lambda} = 0.332 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}}$$

λ در این رابطه نشان دهنده هدایت حرارتی هواست و L طول مشخصه تعریف شده است.

منحنی مشخصه خشک شدن (CDC):

Keey and Suzuki در سال ۱۹۷۴ برای تغییرات مقاومت داخلی اجسام در فرآیند خشک شدن جابجایی، تابع مشخصه را ارائه داده‌اند. این تابع بنام تابع مشخصه $f(\phi)$ بیانگر مقاومت داخلی جسم در برابر خشک شدن است و برای مواد بیولوژیکی مانند میوه‌ها، سبزیجات، چوب و غیره با تقریب مناسبی بکار می‌رود.

Desmorieux و همکاران در سال ۲۰۰۸ منحنی مشخصه خشک کردن انبه را به دست آورده و در مدل خود استفاده کرده‌اند. تابع مشخصه در معادله (۱۱) ارائه شده است:

۴۴

(۱۱)

$$f(\phi) = \frac{v}{v_1} = \frac{-dx/dt}{(-dx/dt)_1}$$

v_1 میزان خشک شدن در فاز اول است و ϕ عبارتی است که بیانگر انحراف مقدار رطوبت جسم از مقدار رطوبت تعادلی (x_{eq}) است. قاسمی کادیجانی، (۱۳۸۱) نیز از این نسبت برای خشک کردن پروتئین تک یاخته در خشک کن پاششی استفاده کرده است.

جدول ۱- نتایج آزمایش‌های تعیین مقدار n و رطوبت بحرانی (Desmorieux et al., 2008)

شماره آزمایش	دمای هوای T_a (°C)	رطوبت نسبی هوا RH (%)	مقدار رطوبت اولیه x_i ($kg_w kg_{dm}^{-1}$)	مقدار رطوبت بحرانی x_{cr} ($kg_w kg_{dm}^{-1}$)	پارامتر n
۱	۴۲	۱۶	۷/۷	۶/۸	۱/۱
۲	۶۰	۵	۴/۶	۱۲/۰	۰/۸۷
۳	۵۲	۴۰	۶/۸	۴/۱	۱/۲۸
۴	۳۵	۷۰	۵/۱	۴/۵	۱/۰

(۱۵)

$$\begin{cases} \phi = 0; & f(\phi) = 1 \\ 0 < \phi < 1; & 0 < f(\phi) < 1 \\ 1 \leq \phi; & f(\phi) = 1 \end{cases}$$

(۱۶)

$$M_s \cdot (c_{p,dm} + x c_{p,w}) \cdot \left(\frac{dT_p}{dt} \right) = -\dot{m} \cdot a_c \cdot \Delta H +$$

$$Q_{abs} + h \cdot a_c \cdot (T_{a,in} - T_p)$$

Q_{abs} میزان فلاکس تشعشعی^۲ است که توسط سطح جسم جذب شده است و رابطه اش در معادله (۱۷) ارائه شده است:

$$Q_{abs} = \alpha \cdot Q_{ray} \quad (۱۷)$$

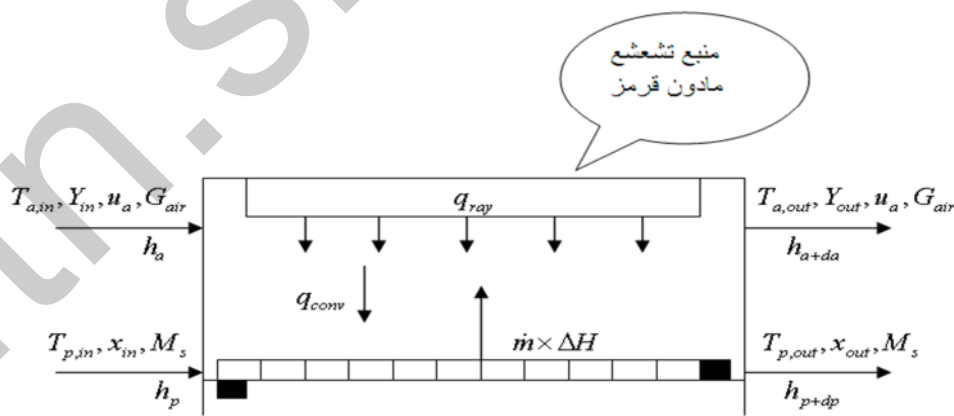
α ضریب جذب جسم است که برای اجسام خاکستری این میزان عددی بین ۰ تا ۱ است. Q_{ray} نیز مقدار فلاکس انرژی مادون قرمز منبع ساطع کننده است.

حل مدل

مدل جابجایی: معادلات اصلی (۱) تا (۵) به همراه رابطه تابع مشخصه و بدست آوردن x_{eq} بصورت عددی با روش اختلاف محدود به کمک برنامه ریاضی MATLAB حل شده است. رطوبت اولیه جسم $x_{in} = 5 \text{ kgw/kgdm}$ با رطوبت بحرانی ماده مورد نظر (انبه) $x_{cr} = 4.5 \text{ kgw/kgdm}$ و با ابعاد $0.06 \times 0.01 \times 0.01$ متر (Desmorieux et al., 2008) در نظر گرفته شده است. حل معادلات تا جایی ادامه دارد که رطوبت نهایی مورد نظر به مقدار $x_{out} = 0.13 \text{ kgw/kgdm}$ برسد. اطلاعات مورد استفاده در جدول ۲ گردآوری شده است.

خشک کن ترکیبی (جابجایی - تشعشعی): به منظور مدل سازی خشک کن ترکیبی علاوه بر تمامی فرضیات در طراحی خشک کن جابجایی، فرض شده است که جسم خاکستری^۱ است و تشعشع مادون قرمز تنها در سطح جسم جذب شده است. این جذب باعث ایجاد گرما شده و در موازنه حرارت جسم موثر است. از آنجائیکه انتقال انرژی از منبع تشعشعی به جسم بدون گرم کردن محیط اطرافش صورت گرفته، لذا تأثیری روی تغییرات آنتالپی هوا ندارد. بنابراین تمامی روابط موازنه جرم و حرارت برای هوا صادق است و همین طور بدلیل اینکه در انتقال انرژی تشعشعی نیاز به حضور ماده نیست، هیچ انتقال جرمی هم صورت نگرفته و موازنه جرم برای ماده که در خشک کن جابجایی استفاده شده، برای خشک کن ترکیبی نیز قابل استفاده است. مطابق شکل ۴ موازنه حرارت برای فاز ماده تغییر کرده و در معادله (۱۶) ارائه شده است.

موازنه انرژی برای فاز ماده



شکل ۴- قسمتی از خشک کن ترکیبی که موازنه جرم و حرارت برای آن اعمال شده است.

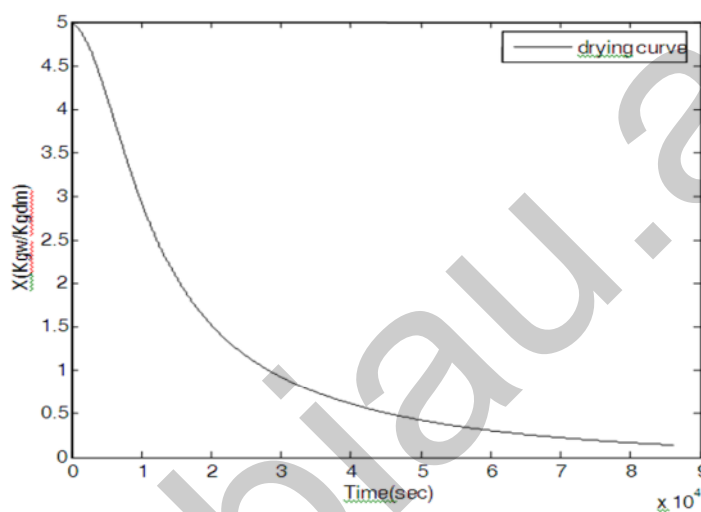
^۱ gray body

^۲ IR Flux Density

ادغام خشک کن جابجایی و تشعشعی جهت کاهش زمان خشک شدن

جدول ۲- اطلاعات مربوط به ماده و جسم

$c_{p,a} = 1007/35 \text{ Jkg}^{-1} \text{K}^{-1}$	$c_{p,dm} = 1463 \text{ Jkg}^{-1} \text{K}^{-1}$
$c_{p,v} = 1840 \text{ Jkg}^{-1} \text{K}^{-1}$	$c_{p,w} = 4180 \text{ Jkg}^{-1} \text{K}^{-1}$
$T_{a,in} = 60^\circ \text{C}$	$T_{p,in} = 25^\circ \text{C}$
$\phi_{in} = 10\%$	$x_{in} = 5 \text{ kg}_w \text{ kg}_{dm}^{-1}$
$Y_{in} = 0.13$	$\Delta H = 2500/18 \text{ Jkg}^{-1}$
$u_a = 1 \frac{m}{sec}$	$\lambda = 0.0287 \text{ Wm}^{-1} \text{K}^{-1}$
$\rho_{air} = 1/0.6 \text{ kgm}^{-3}$	$\mu_{air} = 0.0000201 \text{ kgm}^{-1} \text{sec}^{-1}$
$D_m = 0.000025 \text{ m}^2 \text{sec}^{-1}$	$x_{out} = 0.13 \text{ kg}_w \text{ kg}_{dm}^{-1}$



شکل ۵- نمودار خشک شدن جابجایی برای مدل شبیه سازی شده ($RH = 10\%$, $u_a = 1 \text{ m/sec}$, $T_a = 60^\circ \text{C}$)

شدن برای جسم مورد نظر (انبه) ۲۴ ساعت (۸۶۴۰۰ ثانیه) با شرایط یکسان هوای داغ ورودی حاصل شد. مطابق نمودار شکل ۵، ماده مورد نظر (انبه) پس از گرفتن حرارت لازم رطوبت سطحی خود را از دست داده و پس از آن میزان خشک شدن در فاز دوم کاهش میابد تا به مقدار رطوبت مورد نظر برسد و همانطور که نشان داده شده هر دو فاز خشک شدن در نمودار نمایان شده است. شکل ۶ مقایسه نمودار رطوبت برحسب زمان برای خشک کردن انبه در خشک کن نیمه صنعتی (واگنی) (Desmorieux *et al.*, 2008) تحت مکانیزم جابجایی با شرایط هوا یعنی دمای 60°C و رطوبت نسبی ۱۰٪ و سرعت ۱ متر بر ثانیه و نتایج حاصل از مدلسازی را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود همپوشانی خوبی بین دو نمودار وجود دارد، بجز در اوایل منحنی خشک شدن که خطای کمی مشاهده می شود. علت این امر استفاده از مقدار رطوبت مطلق تعادلی

مدل ترکیبی (جابجایی- تشعشعی): این مدل سازی بصورت عددی با کمک برنامه ریاضی MATLAB حل شده است. معادلات اصلی این مدل (۱) و (۳) و (۴) و (۵) و (۱۶) می باشند.

یافته ها

مدل لایه نازک برای خشک کن جابجایی مطابق با روابط ارائه شده در فوق مدل سازی گردید، بدین منظور از داده های موجود در جدول شماره (۱) (Desmorieux *et al.*, 2008) استفاده شد. مشخصات حرارتی جسم بر اساس داده های (Mabrouk *et al.*, 2006) و شرایط هوای داغ، دمای 60°C و رطوبت نسبی ۱۰٪ و سرعت ۱ متر بر ثانیه (جدول ۲) در نظر گرفته شده است.

شکل ۵، پروفایل رطوبت جسم بر حسب زمان، نتیجه مدل سازی ارائه شده می باشد که بر طبق آن زمان خشک

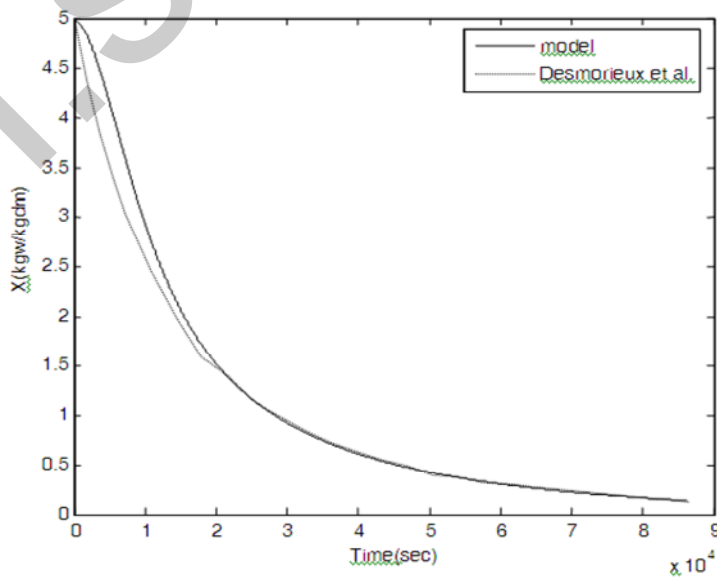
زمان خشک شدن ماده نشان داده شده است. با توجه به نمودار برای دمای هوای خشک شونده 30°C ، البته با همان شرایط اول برای رطوبت و سرعت هوا، زمان لازم برای خشک شدن حدود 39 hr (140400 sec) است. برای دمای هوای خشک شونده 40°C ، این زمان 36 hr (130000 sec) است و برای دمای 50°C این زمان حدود 29 hr (104400 sec) می باشد. نتایج مشخص کرده است که در زمانهای اول خشک شدن نمودارها بعلا با بودن میزان خشک شدن بهم نزدیکتر هستند، در یک زمان مشخص محتوای رطوبت جسم خشک شونده برای دمای کمتر هوای خشک شونده بیشتر است.

تغییرات دما و سرعت هوا با اینکه زمان خشک شدن را کاهش می دهند اما اعمال این تغییرات خود نیاز به مصرف انرژی بالایی دارد. در شکل ۹ نتیجه مقایسه تغییرات مقدار رطوبت ماده با اشعه مادون قرمز و بدون آن نشان داده شده است. مدل سازی انجام شده برای خشک کن ترکیبی در شرایط دمای هوا 30°C ، سرعت 1 m/s برثانیه با رطوبت نسبی 10% و شدت تشعشع مادون قرمز $Q_{ray} = 500\text{ W/m}^2$ است. علت انتخاب سرعت پایین برای هوا این است که با وجود تشعشع مادون قرمز در سرعت پایین میزان خشک شدن افزایش میابد. زمان خشک شدن در خشک کن ترکیبی 58% کاهش یافته است که این میزان کاهش برای خشک کردن ماده‌ای با رطوبت بالا بسیار مناسب است.

جسم در رابطه (۵) است که برای موادی که مقاومت داخلی کوچکی در برابر انتقال جرم و حرارت دارند $T_s = T_p$ و Y_{eq} باید بر حسب دما و رطوبت جسم تعیین شود، ولی در این مدل از تابعیت رطوبت جسم صرف نظر شده و این مسئله کمی دقت مدل را کم کرده است.

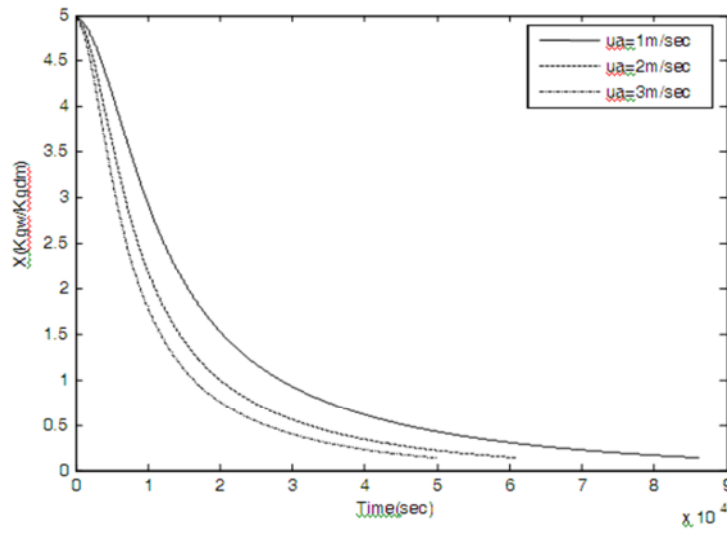
بحث

از پارامترهای موثر در تسریع خشک شدن، سرعت هوای عبوری از روی ماده در خشک کن جابجایی است. سرعت هوا در مدل بکاررفته 1 m/s بر ثانیه است. در شکل ۷ اثر سرعت هوای گرم از 1 m/s بر ثانیه تا 3 m/s بر ثانیه بدون تغییر شرایط دیگر روی زمان خشک شدن نشان داده شده است. افزایش سرعت هوای خشک کننده باعث کاهش زمان خشک شدن می شود زیرا با افزایش سرعت هوا ضریب انتقال جرم و حرارت بین هوا و ماده خشک شونده افزایش یافته و ماده زودتر رطوبت خود را از دست می دهد بطوریکه وقتی سرعت هوا از 1 m/s بر ثانیه به 2 m/s بر ثانیه و 3 m/s بر ثانیه میرسد بترتیب زمان خشک شدن 30% و 42% کاهش میابد. یکی دیگر از پارامترهای موثر روی سرعت خشک شدن در خشک کن جابجایی، حرارت هوای گرمی است که از روی جسم عبور می کند. افزایش دمای هوا باعث کاهش زمان خشک شدن می شود زیرا با افزایش دما میزان اختلاف دمای هوا و جسم خشک شونده زیاد شده و مقدار حرارتی که هوا به جسم می دهد افزایش میابد. در شکل ۸ اثر تغییرات دمای هوا را روی

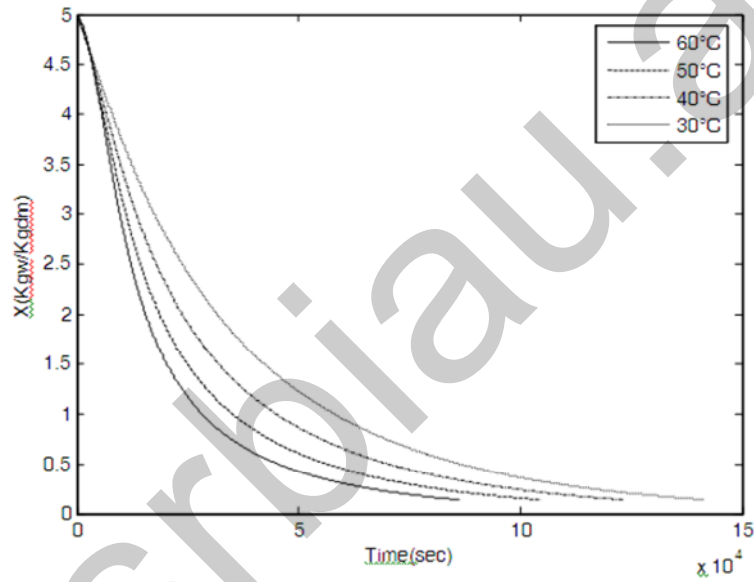


شکل ۶ - مقایسه نمودار خشک شدن جابجایی آزمایشگاهی و مدل شبیه سازی شده

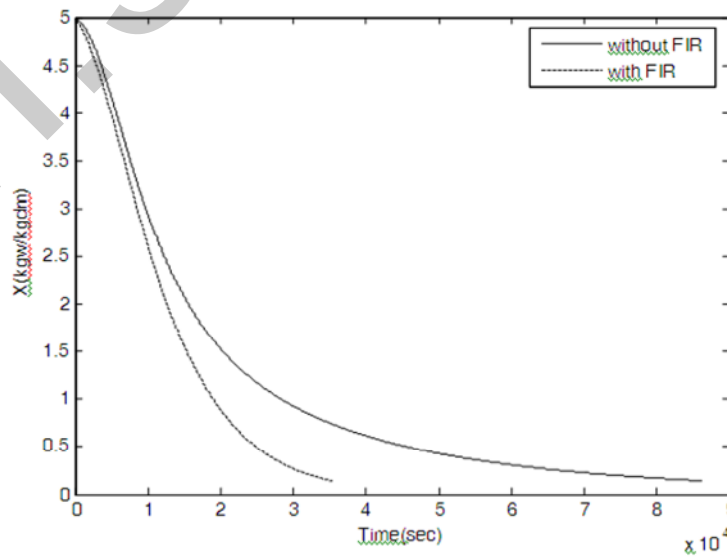
ادغام خشک کن جابجایی و تشعشعی جهت کاهش زمان خشک شدن



شکل ۷- اثر تغییر سرعت هوا روی زمان خشک شدن



شکل ۸- اثر تغییر دمای هوا روی زمان خشک شدن



شکل ۹- مقایسه پروفایل رطوبت در دو خشک کن

نتیجه گیری

پروفایل تغییر مقدار رطوبت میوه گرمسیری بعنوان نمونه در یک خشک کن جابجایی پیوسته و یک خشک کن ترکیبی جابجایی- تشعشی شبیه سازی و مدل سازی شده است. نتایج مدلسازی خشک کن جابجایی با نتایج خشک کردن جابجایی برای خشک کردن انبه در خشک کن نیمه صنعتی (واگنی) (Desmorieux *et al.*, 2008) مقایسه شد که روند تغییرات رطوبت با تقریب بسیار مناسبی بود.

همچنین تغییرات شرایط دما و سرعت هوا بر روی زمان خشک شدن در خشک کن جابجایی بررسی شد که با افزایش دما و افزایش سرعت هوا، زمان خشک شدن کاهش می یابد. با ادغام خشک کن جابجایی و تشعشی میزان نرخ خشک شدن افزایش می یابد در نتیجه زمان خشک شدن تا حدود ۵۸٪ کاهش می یابد در حالیکه به کیفیت محصول لطمه ای وارد نمی شود.

علائم اختصاری

a_c	ضریب تصحیح سطح (m^2 / m^2)	RH	رطوبت نسبی هوا
c_p	گرمای مخصوص ($Jkg^{-1}K^{-1}$)	T	دما ($^{\circ}C$)
D_m	ضریب نفوذ جرمی ($m^2 sec^{-1}$)	t	زمان (sec)
f	تابع مشخصه	u_a	سرعت هوا ($m sec^{-1}$)
G_{air}	فلاکس جرمی هوا ($kgm^{-2} sec^{-1}$)	v	نرخ خشک شدن ($kgwk_{dm}^{-1} sec^{-1}$)
h	ضریب انتقال حرارت جابجایی ($Wm^{-2}K^{-1}$)	ΔH	گرمای نهان تبخیر آب ($Jkgw^{-1}$)
k	ضریب انتقال جرم ($m sec^{-1}$)	x	مقدار رطوبت جسم ($kgwk_{dm}^{-1}$)
K	ضریب پخش حرارتی ($m^2 sec^{-1}$)	x_{cr}	مقدار رطوبت بحرانی جسم ($kgwk_{dm}^{-1}$)
L	طول مشخصه (m)	Y	رطوبت مطلق هوا ($kgwk_{da}^{-1}$)
\dot{m}	فلاکس جرمی آب تبخیر شده ($kgwm^{-2} sec^{-1}$)	ρ_{air}	جرم حجمی هوا (kgm^{-3})
Pr	عدد پرنتل	M_s	جرم ماده خشک شونده به واحد سطح (kgm^{-2})
Q_{ray}	میزان فلاکس انرژی مادون قرمز (Wm^{-2})	α	ضریب جذب
Re	عدد رینولدز	P_t	فشار کل ($mmHg$)
اندیس ها			
a	هوا	in	ورود به سیستم
da	هوای خشک	out	خروج از سیستم
eq	مقدار تعادل	w	آب
p	ماده خشک شونده	v	بخار
dm	جسم خشک	sat	اشباع

منابع

قاسمی کادیجانی، ه. (۱۳۸۱). مدلسازی و طراحی خشک کن پاششی برای خشک کردن پروتئین تک یاخته (S.C.P). پایان نامه کارشناسی ارشد، کتابخانه مرکزی دانشگاه تربیت مدرس.

Afzal, T. M., Abe, T. & Hikida, Y. (1999). Energy and quality aspects during combined FIR- convective drying of barley. Journal of Food Engineering, 42,177-182.

Akpinar, E. K., Midilli, A. & Bicer, Y. (2003a). Single layer drying behaviour of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling. Energy Conversion and Management, 44(10), 1689-1705.

Desmorieux, H., Diallo, C. & Coulibaly, Y. (2008). Operation simulation of convective and semi-industrial mango dryer. Journal of Food Engineering, 89,119-127.

Doymz, I. (2004). Drying kinetics of white mulberry. Journal of Food Engineering, 61,341-346.

- Earle, R. (1988). Unit Operations in Food Processing, second ed., Pergamon Press, Ltd., Oxford.
- Guerrero-Beltran, J. A., Valdez-Fragoso, A. & Welti-Chanes, J. (2000). Hygroscopic properties in osmotic dehydrated mango. In: Eighth International Congress on Engineering and Food, Welti Chanes, Barbosa, Aguilera, pp. 257-268.
- Guine, R. P. F., Rodrigues, A. E. & Figueiredo, M. M. (2007). Modelling and simulation of pear drying. Applied Mathematical and Computation 192,69-77.
- Hayashi, H. (1989). Drying technologies of foods – their history and future, Drying Technology 7 (2), 315-369.
- Hebbar, H. U., Viahwanathan, K. H. & Ramesh, M. N. (2004). Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables. Journal of Food Engineering, 65, 557-563.
- Ibarz, A. & Barbosa-Canovas, G. V. (2000). Unit operations in food engineering. New York: CRC Press.
- Incropera, F. P. & DeWitt, D. P. (1996). Fundamental of heat and mass transfer. New York: John Wiley and Sons, 802 pp.
- Karim, M. A. & Hawlader, M. N. A. (2005). Mathematical modelling and experimental investigation of tropical fruits drying, International Journal of Heat and Mass Transfer, 48, 4914-4925.
- Keey, R. B. & Suzuki, M. (1974). On the characteristic drying curve. International Journal of Heat and Mass Transfer, 17, 1455-1464.
- Kostaropoulos, A. E. & Saravacos, G. D. (1995). Microwave pretreatment for sun-dried raisins. Journal of food science, 60(2), 344-347.
- Lacerda, A. F., Lisboa, M. H. & Barrozo, M. A. S. (2005). Heat and Mass transfer in a countercurrent moving bed dryer. Applied Thermal Engineering, 25, 2641-2652.
- Lewicki, P. P. (1998). Effect of pre-drying, drying and rehydration on plant tissue properties. A review. International Journal of Food Properties 1,1 – 22.
- Mabrouk, S. B., Khiari, B., & Saaai, M. (2006). Modelling of Heat and mass transfer in a tunnel dryer. Applied Thermal Engineering, 26, 2110-2118.
- Mills, A. F. (1995). Basic heat and mass transfer, IRWIN, MA.
- Mongpraneet, S., Abe, T. & Tsurusaki, T. (2002). Accelerated drying of welsh onion by far infrared radiation under vacuum conditions. Journal of Food Engineering, 55, 147-156.
- Myara, R. M. & Sablani, S. (2001). Unification of fruit water sorption isotherms using artificial neural networks. Drying Technology, 19 (8), 1543-1554.
- Nowak, D. & Lewicki, P. P. (2004). Infrared drying of apple slices. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 5, 353-360.
- Queiroz, M. R. & Nebra, S. A. (2001). Theoretical and experimental analysis of the drying kinetics of banana. Journal of Food Engineering 47, 127-132.
- Sandu, C. (1986). Infrared radiative drying in food engineering: A process analysis. Biotechnology Progress, 2(3), 109-119.
- Sharma, G. P., Verma, R. C. & Pathare, P. (2005). Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices. Journal of Food Engineering, 71, 282-286.
- Simal, S., Deya, E., Frau, M. & Rossello, C. (1997). Simple modeling of air drying curves of fresh and osmotically pre-dehydrated apple cubes. Journal of Food Engineering, 33, 139-150.