مروری بر یکنواخت سازی گرمایش مایکروویوها در خشک کردن محصولات کشاورزی

آذر خدابخشی[۱]، حسن صدرنیا[۲]

۱:دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد

۲:دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد

*azar_khodabakhshi@yahoo.com

چکیده

خشک کردن با مایکروویو، تکنیک پیشرفته ای است که در آن گرما از داخل مواد تولید می شود که ناشی از انتقال انرژی الکترومغناطیسی با فرکانس بالاست تا رطوبت مایع به میزان زیادی بخار گشته و به سوی سطح مواد منتقل می گردد. گرمایش مایکروویو، کاربردهای بسیار وسیعی در صنایع غذایی مانند پخت و پز، خشک کردن، پاستوریزه کردن، استریلیزه ،بلانچینگ و حفظ مواد غذایی دارد.علی رغم مزایای فراوان مایکروویو، ناهمگونی دما(وجود نقاط داغ و سرد) یک عیب اساسی در آن محسوب می شود که ناشی از ترکیبات ماده غذایی،شکل هندسی آن و غیریکنواختی میدان مغناطیسی در محفظه مایکروویو است. راهکارهای زیادی برای حل این مشکل ارایه شده‌است که شامل: طراحی سینی گردنده، مدل سازی و شبیه سازی بهینه محفظه، تغییر فرکانس مایکروویو از طریق تغییر آرایش مگنترونها و کنترل توان، تغییر خواص دی‌الکتریک مواد غذایی درون مایکروویو و غیره می باشد. این مقاله به مرور راهکارهایی برای یکنواخت ساختن دما در مایکروویو می پردازد.

واژگان کلیدی: توزیع دما ، خشک کردن ، خواص دی‌الکتریک ،مایکروویو، گرمایشRF، یکنواختی گرمایش.

مقدمه

در فرآوری مایکروویو، امواج الکترومغناطیسی با فرکانس‌های خاص برای حرارت‌دهی محصولات غذایی استفاده می‌شود. عموماً دو فرکانس (۹۱۵MHz و ۲۴۵۰MHz) برای فرآوری مواد غذایی توسط مایکروویو استفاده می‌گردد. حرارت توسط مکانیسم‌های دی-الکتریک و یونی تولید می‌شود. حرارت دی‌الکتریک به علت نوسان مولکول‌های قطبی من جمله مولکول‌های آب در ماده غذایی است. مهاجرت نوسانی یون‌ها در ماده غذایی همچنین تحت تاثیر نوسان الکتریک، حرارت تولید می‌کند. این دو پدیده منجر به تولید سریع حرارت شده و در نتیجه برای رسیدن محصول به دمای مطلوب، نیاز به زمان کمتری دارند. همچنین منجر به تولید حرارت یکنواخت در مقایسه با حرارت‌دهی هوای گرم در روش متداول می‌شود.(رسولی و همکاران، ۱۳۹۴) اما هنوز هم، غیریکنواختی دما(وجود نقاط گرم و سرد) یک عیب اساسی در آن محسوب می شود که ناشی از شکل هندسی ماده (Li *et al*.,2011; Hossanetal.,2010;Knoerzer *et al*.,2008) و ترکیبات آن و غیریکنواختی میدان مغناطیسی در محفظه مایکروویو

است(Zhang *et al*.,2006; Vadivambal and Jayas.,2010).حرارت دادن اضافی ممکن است موجب سوختن ماده، تغییر در رنگ و مزه و مخاطرات سلامتی انسان گردد. بنابراین یکنواختی حرارت یک مسئله کلیدی در تحقیقات اخیر بوده‌است (Li *et al*.,2011Zhang *et al*.,2006; Vadivambal and Jayas.,2010). عدم یکنواختی حرارت در مواد غذایی پیامدهای منفی در پی دارد. نخست اینکه موجب پایین آوردن کیفیت غذا از طریق بیش پزی یا سوختن نقاطی می‌شود که در معرض بیشترین حرارت قراردارند. دوم آنکه بافت غذا را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد. اگر اختلاف دمای بین دو نقطه داغ و سرد متوالی زیاد باشد، گاهی اوقات حتی تشخیص بافت اولیه غذا، بسیار مشکل خواهدبود. سوم، میکروارگانیزم‌های فعال مانند باکتری‌ها، ممکن است به دلیل حضور نقاط سرد، در غذا زنده بمانند، که این امر یک خطر جدی برای سلامت انسان به شمار می‌آید(Goksoy *et al*., 1999).حرارت غیریکنواخت در درجه اول، توسط توزیع ناهمگون انرژی مایکروویو در غذاها به وجود می‌آید که ناشی از عواملی همچون: اتلاف دی‌الکتریک، عمق نفوذ، ضخامت، شکل و اندازه محصول است(Kelen *et al*., 2006). در یک مطالعه تجربی، *ساکای و وانگ* تاثیر خواص دی‌الکتریک بر روی توزیع دما در مایکروویو را بررسی کردند(Sakai and Wang., 2004). گاناسکاران و یانگ تاثیر پارامترهایی همچون اندازه، شکل هندسی، نسبت پالس(ضربان) و زمان فرآیند گرمایشی مایکروویو را بر توزیع دمایی نمونه بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که گرمایش پالسی، نسبت به گرمایش مداوم، حرارت یکنواخت‌تری را به وجود می آورد(Gunasekaran and Yang., 2007). شماری از تحقیقات برای کاهش حرارت بیش از حد RF(فرکانس رادیویی)در لبه‌ها و گوشه‌ها و برای نگاهداری کیفیت خواص حسی(بو، عطر، طعم) محصولات کشاورزی انجام شده‌است. این تحقیقات شامل غوطه وری آب داغ(feng *et al*., 2004; Ikediala *et al*., 2002; Kirmaci and singh., 2012; Wang *et al*., 2008)، هوای داغ به کمک گرمایش سطحی(wang *et al*., 2014; Zhou *et al*., 2015)، ترکیب کردن با روش چرخشی یا حرکتی (Birla *et al*., 2008; Birla *et al*., 2004; Jiaoetal., 2012; wang *et al*., 2006) (wang *et al*., 2005; Zhou *et al*.,هم زدن مداوم 2015)،تغییرات الکترود(Tiwari *et al*., 2011a; wang *et al* ., 2008)، روش های احاطه با کاغذهای پلاستیکی (Huang *et al*., 2015; Jiao *et al*., 2015a;Jiao *et al*., 2014; Tiwari *et al*., 2011b) می‌باشد.

آزمایش‌های جامع برای کشف رفتار گرمایش RFیا افزایش یکنواختی دما،زمان‌گیر و پرهزینه هستند. پیشرفت‌های اخیر در تکنولوژی شبیه سازی کامپیوتری، به حل مشکلات کمک می‌کند و موجب پیشرفت‌های زیادی دریکنواخت ساختن دما می‌گردد تا طراحی و مقیاس بندی سیستم RFرا تسهیل کند (Chan *et al*., 2004; Llave *et al*., 2015; (Marra *et al*., 2007; Romano and Marra., 2008).برای مثال *بیرلا* و همکاران(۲۰۰۸) تاثیر موقعیت نسبی نمونه و واسطه محیطی را بر روی توزیع دما در یک جسم کروی، با استفاده از یک مدل کامپیوتری معتبر، تحلیل‌کردند. *تیواری* و همکاران(۲۰۱۱) بر اساس نرم‌افزار COMSOLمدلی را برای بررسی تاثیر اندازه نمونه، شکل و موقعیت عمودی نسبی آن، فاصله الکترودها و موقعیت الکترود بالایی شبیه‌سازی کردند. بر اساس نتایج شبیه‌سازی شده توسط *هانگ، ژو، یان* و همکاران(۲۰۱۵) ،یکنواختی دمای RF می‌تواند با استفاده از یک واسطه با ثابت دی‌الکتریک مشابه با نمونه‌ها، استفاده از الکترودی با مساحت کمتر در قسمت بالایی و قرار دادن

نمونه‌ها درست در قسمت وسط الکترودهای دو صفحه، افزایش یابد. از میان این عوامل، استفاده از یک واسطه با ثابت دی‌الکتریک مشابه با محصول تیمار شده و ضریب اتلاف قابل چشم‌پوشی، یکی از موثرترین روش‌ها برای افزایش یکنواختی دمای RF می باشد(Birla *et al*., 2004;Huang *et al*., 2015;Jiao *et al*., 2014; Tiwari *et al*., 2011b).

اخیرا توجه محققین به سوی گرایش‌های جدیدی برای یکنواخت کردن دمای داخل مایکروویو، معطوف گشته-است که شامل تغییر طراحی محفظه فر مانند کنترل فاز حرارت دهی،آون با فرکانس متغیر و ترکیب حرارت مایکروویو با روش‌های حرارتی دیگر همچون فروسرخ یا هوای داغ می‌باشد تا بتوان محصولات غذایی را در مدت زمان کوتاه و با کیفیت بالا خشک کرد. (Da-Wen Sun., 2006). این مقاله، به مروری بر جدیدترین دستاوردها و راهکارها برای یکنواخت ساختن دما در مایکروویو می‌پردازد و رهنمون‌هایی را برای کارهای تحقیقاتی آتی، ارائه می‌دهد.

مفاهیم

مایکروویو، امواج الکترومغناطیسی مختلف از انرژی تابشی با فرکانس‌های با دامنه ۳۰۰MHz تا ۳۰۰GHz است. طول موج در فضای آزاد برابر با ۱ میلی‌متر تا ۱ متر است. به دلایل احتمالی اختلال با امواج رادیویی و تلویزیون، آون‌های مایکروویو در طول موج ۹۱۵MHz و ۲۴۵۰MHz طراحی شده‌اند (توسط اتحادیه مخابرات بین المللی). آون‌های خانگی در فرکانس‌های ۲۴۵۰MHz عمل می‌کنند (Richardson., 1992). مایکروویو مشابه امواج نوری منتشر می‌شود؛ این امواج توسط اشیاء بزرگ فلزی منعکس می‌شوند، توسط مواد دی‌الکتریک و مواد کوچک فلزی جذب می‌شوند و از سایر مواد دی‌الکتریک عبور می‌کنند. به عنوان نمونه، آب و کربن امواج را جذب می‌کنند. از طرف دیگر، شیشه، سرامیک و بسیاری از ترموپلاستیک‌ها اجازه عبور به امواج مایکروویو را می‌دهند و جذب بسیار اندکی دارند. این امواج همچنین هنگام عبور از یک ماده دی‌الکتریک به ماده دیگر،مشابه عبور امواج نوری از هوا به آب، شکسته می‌شوند (Schubert and Regier., 2005)

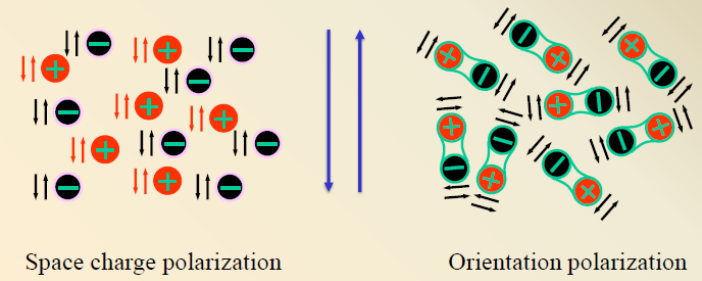
مکانیسم تولید حرارت توسط مایکروویو

دو مکانیسم اصلی برای تولید حرارت توسط مایکروویو در مواد دی‌الکتریک وجود دارد: پلاریزاسیون یونی و چرخش دوقطبی. پلاریزاسیون یونی زمانی که یون‌ها در محلول، در پاسخ به میدان الکتریکی حرکت می‌کنند، اتفاق می‌افتد. انرژی جنبشی توسط میدان‌الکتریکی به یون‌ها منتقل می‌شود. این یون‌ها با یون‌های دیگر برخورد کرده، باعث تبدیل انرژی جنبشی به حرارت می‌شوند. زمانی که یون‌ها تحت تاثیر میدان الکتریکی در فرکانس $۲/۴۵ \times ۱۰^{۹}$ Hz می‌چرخند، مقادیر زیادی از حرارت را تولید می‌کند.

در حالی که مکانیسم چرخش دوقطبی بسیار مهم است، ولی بستگی به حضور مولکول‌های قطبی دارد. مهم‌ترین ماده قطبی در مواد غذایی، آب است. مولکول‌های آب تحت شرایط طبیعی به صورت تصادفی قرار گرفته اند. در حضور میدان الکتریکی، مولکولهای قطبی در راستای میدان جهت می‌گیرند. میدان الکتریکی سیستم مایکروویو در فرکانس $۲/۴۵ \times ۱۰^{۹}$ Hz باعث می‌شود

که مولکول‌ها با تغییر میدان هم-راستا شوند و در نتیجه حرارت تولید شود. زمانی که میدان حذف می‌گردد، مولکول‌ها به جهت گیری اولیه خود باز می‌گردند.

در مایکروویو یک آون یا محفظه بسته استفاده می‌شود. زمانی که مولکول‌های قطبی در معرض مایکروویو قرار می‌گیرند، مولکول-های قطبی تلاش می‌کنند جهت‌گیری خود را در مسیر میدان تغییر دهند، این امر منجر به تولید حرارت توسط مولکول‌های قطبی می‌شود.(شکل۱). نظریه کلی حرارت‌دهی مایکروویو این‌است که فرآیند حرارتی به علت چرخش مولکول قطبی در محیط ویسکوز و تولید حرارت توسط اصطکاک است. همچنین حرارت ممکن است از حرکت یون‌های باردار الکتریکی در داخل ماده غذایی تولید شود. آب، پروتئین‌ها و کربوهیدرات‌ها ترکیبات قطبی در ماده غذایی هستند. سیستم مایکروویو گرما را درون محصول تولید می‌کند که تحت عنوان گرمایش حجمی خوانده می‌شود. در طی حرارت‌دهی مایکروویو امواج الکترومغناطیسی به درون نمونه‌ها نفوذ می-کند بدون آنکه حرارت در سطح بیش از حد شود. بنابراین، حرارت مایکروویو منجر به گرمایش حجمی می‌شود. تاثیر این حرارت-دهی حجمی و عمق نفوذ، توسط ویژگی‌های دی‌الکتریک ماده و فرکانس مایکروویو تعیین می‌گردد. ویژگی‌های دی‌الکتریک ماده، مقدار امواج مایکروویو منعکس شده، عبور داده‌شده یا جذب شده توسط ماده را تعیین می‌کند. . (رسولی و همکاران، ۱۳۹۴)

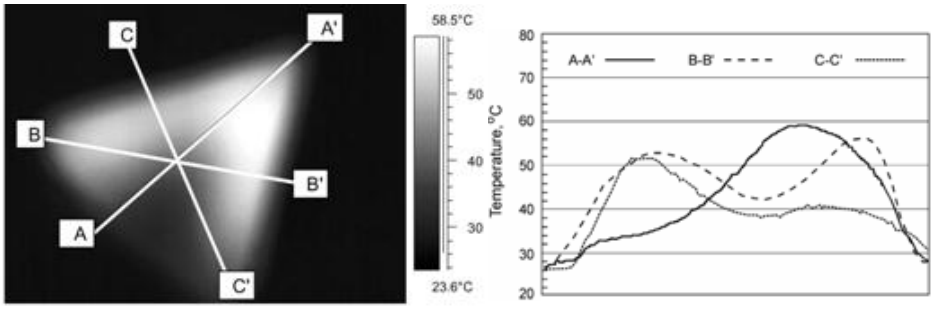


شکل۱:طریقه تشکیل گرمایش مایکروویو در یونها. (رسولی و همکاران، ۱۳۹٤)

عدم یکنواختی در خشک کردن توسط مایکروویو

خشک کردن با مایکروویو، پدیده تولید حرارت داخلی در مواد مرطوب ،در میدان الکترومغناطیسی با فرکانس بالاست. در خشک کردن توسط مایکروویو،گرادیان دما، گرادیان فشار و گرادیان غلظت رطوبت، جهات مشابهی دارند که خروج آب با ساختار بدون سختی (ناشی از سرد کردن تبخیری) را بهبود می‌بخشد. خشک کردن ناهمگن ممکن است ناشی از توزیع غیریکنواخت رطوبت در مواد در حال خشک‌کردن و یا توزیع غیریکنواخت میدان الکترومغناطیسی در محفظه مایکروویو باشد. بنابراین یک ذره نسبتا کوچک منفرد می‌تواند به طور یکنواخت گرم شود، زیرا انرژی گرمایی از قسمت‌های مرطوب ذره تولید می‌شود و قسمت‌های باقی مانده با استفاده از رسانش، گرم می‌شوند. اگرچه جامدات بزرگ با محتوای رطوبتی مکانی، حرارت غیریکنواخت اضافی را تجربه خواهندکرد، زیرا حجم بزرگ آن‌ها نقاط واقع در شدت‌های مختلف میدان مغناطیسی در محفظه مایکروویو، را پوشش‌می‌دهد. (Lee *et al*, 2011)در سال ۱۹۷۱،واتانبل و همکاران یک مطالعه نظری و تجربی بر روی عدم یکنواختی دما در آون مایکروویو

انجام‌دادند(Watanabe., 1971). در سال ۱۹۷۸، اولسون و ریزمانحرارت غیریکنواخت را با استفاده از نگاشت توزیع دمایی در جامدات کروی و استوانه‌ای واقع در معرض تابش مایکروویو، تحلیل کردند(Geedipallietal., 2007).بسیاری از محققان،شمار مختلفی از عوامل موثر در غیریکنواختی گرمایش مایکرویو را حتی در میدان الکترومغناطیسی همگن در محفظه مایکروویو بررسی کرده‌اند. برای مثال وادیوامبال و همکاران تاثیر موقعیت مواد را بررسی‌کردند، چامچونگ و داتا ، ژانگ و داتا، و آراسکیویچ و همکاران تاثیر شکل ماده بر روی غیریکنواختی گرمایش مایکروویو را بررسی‌کردند (Vadivambaletal., 2007; Chamchong and Datta., 1999;Zhang and data., 2005; Araszkiewiczetal., 2007; Araszkiewiczetal., 2006)(شکل ۲).



شکل۲:الگوی گرمایش و پروفیل های دمایی در یک منشور گچی مرطوب، حرارت دیده توسط مایکروویو در ۱۰۰ وات به مدت ۳۰ ثانیه(Araszkiewicz *et al*., 2006)

با مقایسه توزیع دما در حین خشک کردن چاودار و جو دوسر، وادیوامبال و همکاران به این نتیجه رسیدند که الگوهای حرارتی مختلف در این دو ماده را می‌توان به تفاوت در خواص دی‌الکتریک آن‌ها، نسبت‌داد(Vadivambal *et al*., 2007). علاوه بر این، محققین اشاره‌کردند که اشکال و اندازه های مختلف مواد، یکنواختی حرارت را تحت‌الشعاع قرارمی‌دهد.

روش هایی برای بهبود یکنواختی حرارت در خشک‌کن‌های مایکروویو

یکنواختی حرارت مواد در معرض مایکروویو، اساسا به این بستگی دارد که آیا مواد انرژی مایکروویو را به‌طور یکنواخت جذب می کنند یا خیر، که هم از توزیع میدان الکترومغناطیسی در مواد و هم از خواص دی‌الکتریک آن-ها تاثیرمی پذیرد.روش‌های مدیریت مسئله غیریکنواختی دمای مایکروویو ، می‌تواند از دو منظر زیر طبقه‌بندی می‌شوند:(Lee et al, 2011)

- بهبود یکنواختی میدان الکترو مغناطیسی در محفظه مایکروویو

هرچقدر الگوی میدان الکترومغناطیسی در محفظه مایکروویو از نظر گره‌ها و شکم‌ها، پیچیده‌تر باشد، توزیع میدان الکترومغناطیسی یکنواخت‌تر خواهدبود. این الگوی پیچیده، می‌تواند با افزایش تعداد ورودی‌های تغذیه قدرت، نصب یک همزن حالت، استفاده از منابع مایکروویو مختلف با فرکانس‌های مختلف(در عین حال در محدوده مجاز)، به کارگیری گرمایش پالسی مایکروویو، قراردادن

یک رادیاتور متحرک مایکروویو و همچنین طراحی هدفمند و بهینه اندازه و شکل محفظه مایکروویو به وجودآید. بنابراین توزیع یکنواخت‌تر انرژی الکترومغناطیسی در محفظه مایکروویو، یکنواختی گرمایش مواد را افزایش خواهدداد.

داتا و نی،داتا و همکاران،و واپلینگ–راهولت و اولسونانرژی مایکروویو را با پرتوافکنی فروسرخ و هوای داغ ترکیب کردند و توزیع دمایی یکنواخت‌تری نسبت به تابش مایکروویو تنها، مشاهده کردند(Datta and Ni., 2002; Datta *et al*., 2005; Wappling-Raaholt and Ohlsson., 2000). استفاده از همزن حالت، یک روش مرسوم برای ترازکردن شدت میدان الکترومغناطیسی در محفظه ماکروویو است، اگرچه طرح محفظه، تا حد زیادی بر آزمون و خطا استواراست.بنابراین شبیه‌سازی تاثیرات همزن‌های حالت بر گرمایش مواد هنوز هم یک مسئله چالش برانگیز است و منجر به مطالعات نظری و تجربی زیادی گشته‌است..پلازا–گونزالسو همکاراناثر پیکربندی همزن چند حالته را بر روی یکنواختی میدان‌الکتریکی در یک محفظه چند حالته و درون یک نمونه دی الکتریک با سطح مقطع مستطیلی، با استفاده از شبیه‌سازی المان اجزای محدود(FEM) مطالعه‌کردند (Plaza-Gonzalez *et al*., 2004;Plaza-Gonzalez *et al*.,2005). انفینوجنتو و همکاران از یک رادیاتور متحرک مایکروویو، در امتداد مواد خشک‌شده استفاده‌کردند تا یکنواختی دما در مایکروویو را بهبودبخشد و نشان‌دادند که انتخاب مناسبی از سرعت رادیاتور متحرک و سطح قدرت (توان) مایکروویو، می‌تواند منتهی به حرارت همگن گردد(Anfinogentov *et al*., 2002).

افزایش یکنواختی جذب انرژی مایکروویو با جابجایی مواد

در عمل،افزایش یکنواختی گرمایش مایکروویو، همیشه با افزایش یکنواختی میدان‌الکترومغناطیسی، میسرنیست، زیرا توزیع داخلی دما در مواد، نه تنها تحت‌تاثیر الگوی میدان‌مغناطیسی در محفظه مایکروویو قراردارد،(که با بار مواد و خشک‌کردن مداوم تغییر می کند)، بلکه از عوامل دیگری همچون اندازه و شکل مواد، و خواص دی‌الکتریک تاثیر می‌پذیرد. بنابراین جابجایی تصادفی مواد در حین خشک‌کردن، می‌تواند وابستگی به توزیع میدان‌الکترومغناطیسی را کاهش‌دهد، زیرا می‌توان درنظر گرفت که نسبت زمان جذب انرژی مایکروویوبه متوسط فضای آن، احتمال مشابهی داشته‌باشد.

روش‌های جابجایی مواد شامل حرکات در یک صفحه و در فضا می‌باشد. در نمونه اول،خشک‌کن های مایکروویو تسمه ای و آون های مایکروویو خانگی، به یک گرداننده قابل چرخش مجهزهستند. همانطور که توسط منیکاواساگان و همکاران گزارش شد، حرکت ساده مواد بر روی یک تسمه نقاله درون محفظه مایکروویو، گرمایش یکنواخت دانه‌های غله خیس ناشی از الگوی موج سینوسی مایکروویو را، تامین نمی‌کند که به شکل نقاط داغ و سرد توسط دوربین حرارتی فروسرخ، قابل مشاهده است(Manickavasagan *et al*., 2006).

اتونگ و همکاران یک خشک کن پیوسته مایکروویو تسمه ای‌طراحی کردند که با تغییر مکان ماده در حین عبور از تسمه‌نقاله داخل محفظه مایکروویو، با افزایش تعداد ژنراتورهای مایکروویو، و تنظیم توان‌های خروجی، گرمایش یکنواختی در مواد به‌وجود آوردند(Atong., 2006). اگر افزایش یکنواختی خشک‌کردن مایکروویو بر اساس حرکت مواد بر روی یک صفحه باشد، ضخامت

توده نمی‌تواند از عمق نفوذ مایکروویو تجاوز کند.گیدی پالی و همکارانبه این نتیجه رسیدند که اگرچه یک گردنده چرخاندر یک آون ماکروویو می‌تواند یکنواختی گرمایش در مواد را در ضخامت لایه مشابه، افزایش دهد اما عدم یکنواختی هنوز هم در لایه‌های مختلف مواد، واضح است(Geedipalli *et al*., 2007). ریس و همکاران، جنبش خشک‌کردن دانه‌های شلغم خشک‌شده توسط مایکروویو در یک بستر ثابت و بستر سیال پالسی مقایسه‌کردند و دریافتند که نرخ خشک‌کردن در بستر سیال پالسی، بالاتر بود. علاوه بر تماس بهتر ذره با هوا در بستر سیال، محققان اشاره کردند که احتمال اینکه ذرات،تحت اصابت مایکروویو ناشی از اختلاط شدید و شکاف‌های خالی بزرگتر قرار بگیرند، وجود دارد(Reyes *et al*., 2006).

هان و همکاران یک خشک کن مایکروویو خلایی پیوسته را توسعه دادند که در آن یک سیستم انتقال به-طور خاص طراحی شده، مواد به صورت ذره را با استفاده از یک لیسه غلتان که به آرامی مواد را در جهات شعاعی و جانبی فشار می‌دهد، انتقال می‌دهد. حرکت مارپیچی حاصله، یکنواختی جذب مایکروویو را افزایش می‌دهد که عملکرد آن با درجه بالایی از نگهداری رنگ و عطر در حین خشک‌کردن قطعات سیب، اثبات می‌گردد(Han *et al*., 2006).

مدل سازی و شبیه سازی گرمایش مایکروویو

طراحی محصولات غذایی برای گرمایش مایکروویو نیاز به دانشی از اصول گرمایش مایکروویو و آزمایشات بسیار دارد. مدلسازی ریاضی می‌تواند مدت زمان آزمایشهای طولانی را کوتاه سازد. اگر مدل‌ها بتوانند به درستی رفتار گرمایشی غذا در آون مایکروویو را شبیه سازی کنند، تاثیرات ترکیب، شکل هندسی، و تغییرات بسته‌بندی می‌تواند بدون هزینه آماده‌سازی، آزمایش گردد. اگر پیکربندی محفظه آون مایکروویو، خصوصیات دی‌الکتریک و شکل هندسی محصول را داشته باشیم، با استفاده از معادلات ماکسول می‌توانیم پیکربندی دقیق میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در داخل محصول را محاسبه کنیم.

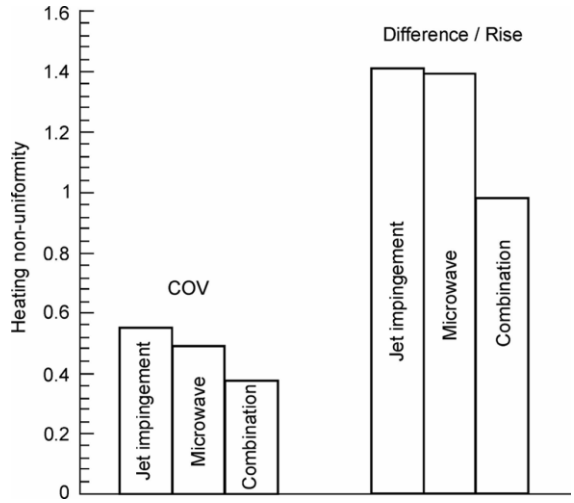
راه‌حل جایگزین دیگر، استفاده از مدل‌سازی است، تکنیکی که هندسه غذا و محفظه آون را به سلول‌های کوچک می‌شکند و معادلات ماکسول می‌توانند برای هر سلول تخمین‌زده شده یا حل گردند. روش‌های عددی بسیاری وجود دارد اما متداول‌ترین آن هاروش دامنه زمان تفاضل محدود(FDTD)، روش دامنه زمان المان محدود(FETD) و روش لحظه ای (MM) می باشند.

رویکردهایی به سوی افزایش یکنواختی گرمایش مایکروویو

همانگونه که پیش‌تر ذکر شد،عوامل بسیاری که موجب عدم یکنواختی گرمایش مایکروویو می‌شوند، پارامترهای چندمتغیره هستند که به پیکربندی محفظه، خصوصیات مواد و حالت عملیات بستگی دارند. بنابراین حل قطعی مشکل عدم یکنواختی بسیار مشکل است.یکنواختی گرمایش در مواد در یک محفظه خشک‌کن مایکروویو، در درجه اول به هندسه کلی و اعمال داخلی محفظه(مانند لیفترها، رفلکتورها، همزن های حالت) و سپس به خواص دی‌الکتریک گذرای موادی که هم بر تولید حرارت داخلی ، و هم بر توزیع زمانی شدت میدان‌الکترومغناطیسی ، تاثیر می‌گذارند، مرتبط می‌شود(Lee *et al*, 2011)

برای افزایش یکنواختی(برای مثال در خشک‌کردن انجمادی مایکروویو)، وانگ و همکاران یک مفهموم جدیدی برای خشک‌کردن انجمادی مایکروویو در مایعات(شیر) را با کمک مهره‌های ساخته شده از موادی با ضریب اتلاف دی‌الکتریک بالا مانند کاربید سیلیکون، پیشنهاد کردند. مدل‌سازی ریاضی انتقال جرم و گرما اجرا شد، و نتایج نشان‌داد که این روش می‌تواند زمان خشک‌کردن را در مقایسه با روش‌های خشک‌کردن انجمادی مایکروویو معمولی یا انجمادی–خلایی مرسوم کوتاه‌تر سازد(به ترتیب ۳۲٪ و ۵۸٪)(Wang *et al.*, 2005).

پلازا–گونزالا و همکاران تاثیر ساختار هم زن حالت را با استفاده از روش المان اجزای محدود مطالعه کردند (Plaza-Gonzalez *et al.*, 2005)، بر اساس معادلات ماکسول، اولیورا و فرانکابازتایش ماکروویو روشن–خاموش شبیه سازی‌شده را با چرخش نمونه ترکیب کردند و دریافتند که این ترکیب پروفیل های دمایی یکنواخت‌تری در مقایسه با هر تکنیک به‌طورجداگانه، ارائه می دهد(Oliveira and Franca., 2002) ترکیب روش‌های خشک‌کردن دیگر با مایکروویو، می‌تواند موجب یکنواختی گرمایش درآن گردد. ترکیب مایکروویو و جت برخوردی می‌تواند از بیش حرارتی ناحیه کمربندی غذاها(گوشه‌ها و لبه‌ها) جلوگیری کند، بنابراین یکنواختی گرمایش ۲۲ تا ۳۰ درصد افزایش می‌یابد(Geedipalli *et al.*, 2008).(شکل ۳)



شکل۳:عدم یکنواختی به دست آمده از طریق ضریب تغییر(COV)و نسبت اختلاف دما به افزایش برای سه حالت خشک کردن(Geedipalli *et al.*, 2008)

سامنو و همکاران از یک لامپ هالوژن برای تولید تابش نزدیک به فروسرخ در طول‌موج در حدود ۵–۰.۷ میکرومتر، در ترکیب با مایکروویو برای خشک‌کردن تکه‌های هویج، بعد از پیش‌خشک‌کنی با هوای داغ تا ۰.۴۷ کیلوگرم/کیلوگرم(بر چایه خشک)، استفاده کردند. در مقایسه با روش‌های دیگر که به طور غیرمستقیم گرمایش یکنواخت‌تری نشان می‌دهند، در این روش رطوبت محصول تا یک سطح پایین‌تر بدون سوختگی و قوس با تغییر کمتر در رنگ کاهش می‌یابد(Sumnu *et al.*, 2005).

اندازه گیری دمای محصول در حین کنترل‌کردن یکنواختی فرآیند گرمایش یا خشک‌کردن مایکروویو،امری بسیار مهم است، اما اندازه‌گیری توزیع دما هنوز هم مسئله پیش‌روی سنسورهای متعددی است که باید به داخل نمونه وارد شوند.لی و همکاراناز

ترموکوپل‌ها، سنسور فروسرخ و دماسنج های فیبرنوری، برای اندازه‌گیری دمای محصول استفاده‌کردند(Li *et al*., 2006). فینگان و همکاران از اندازه گیری های دمایی در خط نوری مبتنی بر فلوروسن، برای آزمایش توزیع دما در فرآیند گرمایش مایکروویو استفاده‌کردند(Finegan *et al*., 2006). تصویربرداری تشدید مغناطیسی نیز برای نقشه‌برداری توزیع دمای سه بعدی در غذاهای واقع در معرض گرمایش مایکروویو، به‌کاررفته‌است(Nott *et al*., 2000; Knoerzer *et al*., 2006).

نتیجه گیری

مطالعات توزیع دما در حین گرمایش مایکروویو، توسط محققین بسیار و بر روی محصولات مختلفی بررسی شده است.نتایج این تحقیقات ثابت می کند که یک اختلاف گسترده ای در توزیع دمایی در حین گرمایش مایکرویو وجود دارد و این توزیع دمایی غیریکنواخت، صرف نظر از نوع مواد حرارت دیده اتفاق میی افتد. محدودیت اصلی برای استفاده از مایکروویو در کاربردهای صنعتی وجود توزیع غیریکنواخت دماست. اگر چه تاکنون راه حل هایی برای کاهش این مشکل در شرایط خاص ارائه شده، اما هنوز هم نمیتوان به طور کلی این پدیده را حذف کرد. تحقیق و توسعه آتی در زمینه بهینه‌سازی ساختار و هندسه خشک-کن‌های مایکروویو، طرح مدولار سیستم خشک‌کن–مایکروویو صنعتی، اندازه‌گیری توزیع دمای محصول، تدوین مدل‌های ریاضی برای فرآیند شبیه سازی و غیره، امری ضروری است. مکان هندسی محصول در داخل محفظه می‌تواند به طور مکانیکی توسط یک شافت محرک(توسط موتور) تغییر-یابد و موجب یکنواخت‌شدن گرمایش درون محفظه گردد. این روش می‌تواند به عنوان راهکاری برای محققین آینده در جهت بهبود یکنواختی گرمایش در مایکروویو، درنظر گرفته‌شود.

منابع

رسولی پیروزیان، ه و همکاران.۱۳۹۴.تکنولوژی نوین مایکروویو در فرآوری مواد غذایی.سومین همایش علوم و صنایع غذایی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

Li, Z.Y et al. 2011. Uniformity issue in microwavedrying. Drying Technology. 29(6):652–660

Hossan, M.R et al, 2010.Analysis of microwave heating forcylindrical shaped objects. International Journal of Heat and MassTransfer. 53(23–24):5129–5138.

Knoerzer, K., et al. 2008. A computational model for calculating temperature distributions in microwave food applications. Innovative Food Science & Emerging Technologies 9(3): 374–384.

Zhang, M., et al. 2006. Trends in microwave- related drying of fruits and vegetables. Trends in Food Science & Technology 17(10):524–534

Vadivambal, R., and Jayas, D. 2010. Non-uniform temperature distributionduring microwave heating of food materials—A review. Food andBioprocess Technology 3(2):161–171

Goksoy, E.O., et al. 1999. Non-uniformity of surface temperatures aftermicrowave heating of poultry meat, J. Microwave Power Electromagn. Energy34 (3):149–160.

Kelen, A., et al. 2006. Mapping of temperaturedistribution in pharmaceutical microwave vacuum drying, Powder Technoly162 (2) : 133–137

Sakai, N., and Wang, C. 2004. An analysis of temperature distribution in microwaveheating of foods with non-uniform dielectric properties, J. Chem. Eng. Jpn. 37(7):858–862.

Gunasekaran, S., and Yang, H. 2007. Effect of experimental parameters on temperaturedistribution during continuous and pulsed microwave heating, J. Food Eng. 78(4):1452–1456.

Feng, X., et al. 2004. Use of hot water treatmentto control codling moths in harvested California ‘bing’ sweet cherries. Postharvest Biology and Technology 31: 41–49.

Ikediala, J., et al. 2002. Development of a saline waterimmersion technique with RF energy as a postharvest treatment against codlingmoth in cherries. Postharvest Biology and Technology 24:209–221.

Kirmaci, B., and Singh, R. K. 2012. Quality of chicken breast meat cooked in a pilot-scaleradio frequency oven. Innovative Food Science & Emerging Technologies 14:77–84.

Wang, S., et al. 2008. Experimental methods for evaluatingheating uniformity in radio frequency systems. Biosystems Engineering 100:58–65.

Wang, Y., et al. 2014. Developinghot air-assisted radio frequency drying for in-shell macadamia nuts. Food and Bioprocess Technology 7(1): 278–288.

Zhou, L., t al. 2015. Developing radio frequency technologyfor postharvest insect control in milled rice. Journal of Stored Products Research 62:22–31.

Birla, S., et al. 2008. Computer simulation of radio frequency heating ofmodel fruit immersed in water. Journal of Food Engineering 84: 270–280.

Jiao, S., et al. 2012. Industrial-scale radio frequency treatmentsfor insect control in lentils. Journal of Stored Products Research48:143–148.

Tiwari, G., et al. 2011. Computer simulationmodel developmentand validation for radio frequency (RF) heating of dry food materials. Journal of FoodEngineering, 105: 48–55

Huang, Z., et al. 2015. Simulation and prediction of radio frequencyheating in dry soybeans. Biosystems Engineering129: 34–47.

Jiao, Y., et al. 2014. A new strategy to improve heating uniformity of lowmoisture foods in radio frequency treatment for pathogen control. Journal of FoodEngineering141:128–138

Chan, T., et al. 2004. 3-dimensional numerical modeling of an industrial radio frequency heating system using finite elements. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy39:87–105.

Llave, Y., et al. 2015. Computer simulation of radio frequencydefrosting of frozen foods. Journal of Food Engineering 152: 32–42.

Marra, F., et al. 2007. Radio-frequency heating of foodstuff: Solution and validation of a mathematical model. Journal of Food Engineering79:998–1006

Romano, V., and Marra, F. 2008. A numerical analysis of radio frequency heating of regularshaped foodstuff. Journal of Food Engineering 84:449–457.

Da-Wen, Sun. 2006. Emerging technologies for processing of foods.chapter16: recent development in microwave heating,419-420

Richardson, P. 1992. Microwave technology—the opportunity for food processors. Food Science and Tech l5(3):146–149.

Schubert, H and M. Regier. 2005. The Microwave Processing Of Foods, Published by Woodhead Publishing Limited, Cambridge

Watanabe, M., et al.1971. Theoretical and experimentalstudy on uneven heating in microwave oven. the Symposium on Microwave Power1: 26–28.

Geedipalli, S., et al. 2007, Modeling the heating uniformity contributed by a rotating turntable in microwave ovens. Journal of Food Engineering 82(3):359–368

Chamchong, M., and Datta, A. 1999. Thawing of foods in a microwave oven:II. Effect of load geometry and dielectric properties. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy34(1):22–32

Araszkiewicz, M., et al.. 2006. the investigation of the microwave assisted drying process.CHISA, Prague, Czech Republic, August 27–31, PaperNo H5.5

Datta, A.K., et al. 2005, Microwave combination heating. Food Technology 59(1): 36–40.

Plaza-Gonzalez, P., et al. 2004. New approach for the prediction of the electricfield distribution in multimode microwave-heating applicatorswith mode stirrers. IEEE Transactions on Magnetics 40(3):1672–1678.

Anfinogentov, V.I., et al. 2002. Optimization of dielectric microwave heating by moving radiator. Proceedings of12th International Crimean Conference on Microwave and TelecommunicationTechnology, Sevastopol, Crimea, Ukraine, September9–13 : pp. 605–606

Manickavasagan, A., et al. 2006. Non-uniformity of surface temperature of grain after microwave treatment in anindustrial microwave dryer. Drying Technology24(12):1559–1567.

Atong, D. 2006. Drying of a slip casting for tableware product using microwave continuous belt dryer. Drying Technology 24(5): 589–594.

Geedipalli, S., et al. 2007. Modeling the heating uniformitycontributed by a rotating turntable in microwave ovens. Journalof Food Engineering 82(3):359–368.

Reyes, A., et al. 2006. Drying of turnip seeds with microwavesin fixed and pulsed fluidized beds. Drying Technology24(11):1469–1480

Oliveira, M.E.C., and Franca, A.S. 2002, Microwave heating of foodstuffs.Journal of Food Engineering53(4):347–359.

Geedipalli, S., et al. 2008. Heat transfer in a combinationmicrowave–jet impingement oven. Food and Bioproducts Processing 86: 53–63.

Sumnu, G., et al. 2005. Drying of carrots in microwave andhalogen lamp–microwave combination ovens. LWT – Food Science and Technology 38: 549–553.

Finegan, T., et al. 2006. In-situ measurements of temperature distributions in a microwave-heated cavity. AIChE Journal:52(8), 2727–2735

Nott, K.P., et al.. 2000. MRI phase mapping of temperature distributions induced in food by microwave heating. Magnetic Resonance Imaging18: 69–79.

Knoerzer, K., et al. 2006. Microwave heating: A new approach of simulation and validation. Chemical Engineering & Technology29(7): 796–801.