



تحلیل توزیع دما و شار گرمایی در خشک کردن هویج با استفاده از نرم افزار Abaqus

مجید رجبی وندچالی^{۱*}، باقر عمادی^۲

۱- مربی گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد جویبار، جویبار، ایران

۲- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

* ایمیل نویسنده مسئول: m_rajabivandechali@stu.um.ac.ir

چکیده

خشک کردن مواد حدود ده درصد از کل انرژی مصرفی در صنایع غذایی را به خود اختصاص می دهد. مصرف زیاد انرژی در صنعت خشک کردن مواد غذایی، آنرا به مهمترین عملیات صنعتی تبدیل کرده است. بنابراین یکی از مهمترین چالشها در صنایع تولید خشکبار، کاهش انرژی برای تولید محصولات خشک با کیفیت مطلوب می باشد. در تحقیق حاضر توزیع دما و شار گرمایی در خشک کردن هویج با استفاده از نرم افزار Abaqus بررسی شد. خشک کردن در دمای ۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد بر روی یک قطعه‌ی مکعبی هویج به ابعاد ۴ میلی متر به دو صورت مداوم و متناوب انجام شد. حرارت‌دهی متناوب، به مدت ۲۱۰ ثانیه، به صورت ۳۰ ثانیه حرارت‌دهی و سپس ۳۰ ثانیه توقف و حرارت دهی مداوم به مدت ۱۲۰ ثانیه انجام شد. در پایان، پروفیل‌های توزیع تغییر دما و شار گرمایی در قطعه و همچنین نمودارهای توزیع در مرکز وجوه و مرکز مکعب تهیه شد. نتایج نشان داد که حداکثر تغییرات دما در هر دو روش، در نزدیکی لبه‌های مکعب و در گوشه‌های تیز بود و در زمان حرارت‌دهی، یک روند افزایشی نسبتاً خطی را داشت. توزیع شار گرمایی در هر دو روش، رفتاری مشابه داشته و حداکثر شارش گرمایی در گوشه‌های مکعب و سپس در نزدیکی لبه‌ها و بعد از آن در نواحی میانی وجوه رخ داد. نتایج به دست آمده به طور کیفی با نتایجی که توسط محققین در آزمایشات تجربی گزارش شد، تفاوت داشت. مهم‌ترین منبع خطا، عدم تغییر شار گرمایی سطحی (Surface Heat Flux) متناسب با تغییرات دما در قطعه بود.

واژه‌های کلیدی: انرژی، خشک کردن، دما، شار گرمایی، هویج.



مقدمه

در سال‌های اخیر خشک کردن مواد غذایی به منظور نگهداری آن‌ها برای مصرف خشک و نیز به عنوان عملیات حد واسط در پروسه‌های صنایع غذایی به طور گسترده‌ای کاربرد دارد (Smith, 2007). میوه‌ها و سبزیجات تازه به واسطه افزایش یافتن محتوای رطوبتی، به طور جدی در معرض فساد قرار دارند. خشک کردن، بهترین راه برای به حداقل رساندن ضایعات آن‌ها می‌باشد و نیز به واسطه کمتر شدن وزن و حجم محصولات خشک، بسته بندی و حمل و نقل آن آسان‌تر و ارزان‌تر می‌شود (Stanislawski, 2005).

خشک کردن در عمل، فرآیندی است که انرژی ورودی بسیاری را به دلیل وجود گرمای نهان تبخیر آب و بازده نسبتاً کم خشک-کن‌های صنعتی، نیاز دارد (Syahrul, 2009). خشک کردن مواد حدود ده درصد از کل انرژی مصرفی در صنایع غذایی را به خود اختصاص می‌دهد (Smith, 2007). مصرف مقادیر زیاد انرژی در صنعت خشک کردن مواد غذایی، آنرا به پر مصرف‌ترین عملیات و با اهمیت زیاد صنعتی تبدیل کرده است (Aghbashlo *et al.*, 2009). بنابراین یکی از مهمترین چالشها در صنایع تولید خشکبار، کاهش هزینه منابع انرژی برای تولید محصولات خشک با کیفیت مطلوب می‌باشد. از این رو تحلیل موثر ترمودینامیکی برای خشک‌کن‌ها، با هدف صرفه جویی در مصرف انرژی و بهینه سازی متغیرهای فرآیند، لازم و ضروری می‌باشد (Syahrul, 2009).

اخیراً مطالعات متعددی در زمینه تحلیل انرژی در خشک کردن مواد غذایی انجام شده است (Aghbashlo *et al.*, 2009; Akbulut and Durmus, 2010; Celma and Cuadros, 2009). حمیدخانی و همکاران (۱۳۸۹) فرآیند خشک کردن پسته را با حرارت دادن متناوب و مقایسه با حرارت‌دهی مداوم، بهینه سازی کردند. ناز قلیچی و همکاران (۱۳۸۹) انرژی و اکسرژی سیستم در یک خشک‌کن بستر سیال آزمایشگاهی را بر روی هویج‌های مکعب شده مورد تحلیل قرار دادند. با توجه به اهمیت موضوع و بحران انرژی، هدف تحقیق حاضر، تحلیل نرم‌افزاری توزیع تغییرات دما و انرژی (شار گرمایی) در فرآیند خشک کردن هویج بود.

مواد و روش‌ها

مشخصات نمونه‌ی مورد آزمون

یک قطعه از جنس هویج به ابعاد ۴*۴*۴ میلی‌متر مکعب برای فرآیند حرارت‌دهی و انجام تحلیل‌ها در نظر گرفته شد (ناز قلیچی و همکاران، ۱۳۸۹). جدول ۱، مشخصات نمونه را نشان می‌دهد که از خواص فیزیکی مربوط به هویج اتخاذ شد (Stroshine, 2004):

جدول ۱- خواص فیزیکی نمونه‌ی مورد آزمون.

Product	Moisture Content (% w.b.)	Specific Heat (kJ/kg.K)		Thermal Conductivity (W/m.K)	Apparent Density (Kg/m ³)	Thermal Diffusivity* (m ² /s)
		Above Freezing	Below Freezing			

Carrot, fresh	86 - 90	3.88	1.95	0.585	1015	5.35×10^{-4}
---------------	---------	------	------	-------	------	-----------------------

* محاسبه شده از طریق رابطه‌ی آن با دیگر خواص ماده.

در جدول ۱ مقدار ضریب انتشار حرارتی، گزارش نشده بود و از طریق رابطه‌ی آن با دیگر خواص ماده، به صورت زیر محاسبه گردید (Sitkei, 1986):

$$\alpha = k / c\rho \quad (1)$$

که در آن

α ضریب انتشار حرارتی، k ضریب هدایت حرارتی، c گرمای ویژه و ρ چگالی ماده است.

شرایط آزمون

دمای هوای ورودی برابر ۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد (نازقلیچی و همکاران، ۱۳۸۹؛ حمیدخانی و همکاران، ۱۳۸۹)، دمای محیط برابر ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد (نازقلیچی و همکاران، ۱۳۸۹) و سرعت هوای ورودی برابر ۱٫۲ متر بر ثانیه (حمیدخانی و همکاران، ۱۳۸۹) در نظر گرفته شد. با توجه به دما و سرعت هوای ورودی، ابتدا باید آرام بودن یا اجباری بودن انتقال حرارت تعیین گردد. محاسبات مربوط به این امر به صورت زیر انجام شد (Holman, 1943):

$$\beta = \frac{1}{T_f} \quad (2)$$

که در آن، T_f میانگین حسابی دمای محیط و دمای هوای گرم بر حسب کلون می‌باشد. بنابراین:

$$T_f = \frac{25 + 50}{2} = 37.5^\circ\text{C} = 310\text{K} \Rightarrow \beta = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{310} = 0.0032\text{K}^{-1}$$

عدد گرافش (Grishhoff No.) برابر است با (Holman, 1943):

$$Gr = \frac{g\beta\Delta T.V}{\mu^2} \quad (3)$$

که در آن، Gr عدد گرافش، g شتاب گرانشی زمین (برابر 9.81m/s^2)، ΔT اختلاف دمای هوا و دمای محیط (برابر

25°C)، V حجم نمونه (برابر $6.4 \times 10^{-8}\text{m}^3$) و μ ویسکوزیته‌ی هوا در دمای 50°C (برابر 2×10^{-5}) می‌باشد که با

جایگذاری در رابطه‌ی ۳، مقدار عدد گرافش برابر ۱۲۵.۶ به دست می‌آید.

عدد رینولدز (Reynolds No.) برابر است با (Perry. and Green, 1973):

$$Re = \frac{\rho.u.d}{\mu} \quad (4)$$



که در آن، Re عدد رینولدز، ρ چگالی هوا در دمای $50^{\circ}C$ ، u سرعت هوا و d طول موثر در راستای جریان هوا (در اینجا برابر با طول ضلع مکعب) می‌باشد که با جایگذاری در رابطه‌ی ۴، مقدار عدد رینولدز برابر 240 به دست می‌آید. بنابراین (Perry, 1973 and Green):

$$Gr/(Re)^2 = \frac{125.6}{(240)^2} \quad (5)$$

با توجه به این که نسبت عدد گراشوف به مربع عدد رینولدز، کوچکتر از ۱ شده است بنابراین انتقال حرارت، اجباری است.

برای انتقال حرارت اجباری، عدد ناسلت (Nusselt No.) به صورت زیر است (Perry, 1973 and Green):

$$Nu = 0.332(Re)^{1/2}(Pr)^{1/3} \quad (6)$$

که در آن، Nu عدد ناسلت و Pr عدد پراتل (Prandtl No.) می‌باشد. عدد پراتل برای هوا در دمای $50^{\circ}C$ ، برابر 0.7 است

(Perry, 1973 and Green) که با جایگذاری در رابطه‌ی ۶، مقدار عدد ناسلت برابر 4.56 به دست می‌آید.

از طرفی، عدد ناسلت برابر است با (Holman, 1943):

$$Nu = \frac{h.d}{k} \quad (7)$$

که در آن، h ضریب انتقال حرارت همرفتی و k ضریب انتقال حرارت هدایتی (برابر 0.0275 W/mK برای هوا در دمای

$50^{\circ}C$) می‌باشد که با جایگذاری در رابطه‌ی ۷، مقدار h برابر با 31.35 W/m^2K به دست می‌آید.

نحوه‌ی حرارت‌دهی و استخراج نتایج

حرارت‌دهی نمونه به دو طریق انجام گرفت. در روش اول، به طور متناوب به نمونه حرارت داده شد. ابتدا ۳۰ ثانیه حرارت و سپس ۳۰ ثانیه توقف و به همین ترتیب تا ۲۱۰ ثانیه ادامه یافت که مجموعاً ۱۲۰ ثانیه به حرارت‌دهی اختصاص یافت. در روش دوم، به طور مداوم به مدت ۱۲۰ ثانیه به نمونه، حرارت داده شد. پروفیل‌های توزیع دما (Temperature) و نیز شار گرمایی (Heat Flux) برای هر دو روش، در انتهای حرارت‌دهی استخراج شدند.

شارش گرما بر روی اولین وجه عمود بر جریان هوا و نیز وجوه مماس بر جریان هوا اعمال گردید، اما بر روی وجه انتهایی عمود بر جریان هوا، هیچ‌گونه شار گرمایی اعمال نگردید. اولین وجه عمود بر جریان هوا، (Vertical Surface) VS، وجه مماس بر جریان هوا، (Tangent Surface) TS و سطحی که عمود بر جریان هوا است و مکعب را به دو نیم تقسیم می‌کند، (Middle Surface) MS (شکل‌های ۱ و ۳). مرکز اولین وجه عمود بر جریان هوا، (Center of Vertical Surface) CVS، مرکز وجه مماس بر جریان هوا، (Center of Tangent Surface) CTS و مرکز MS که همان مرکز مکعب است، (Center of Middle Surface) CMS، در هریک از این نقاط، نمودارهای توزیع تغییر دما و نیز شار گرمایی واحد سطح (Surface Heat Flux) در برابر زمان برای هر دو روش حرارت‌دهی استخراج گردیدند.

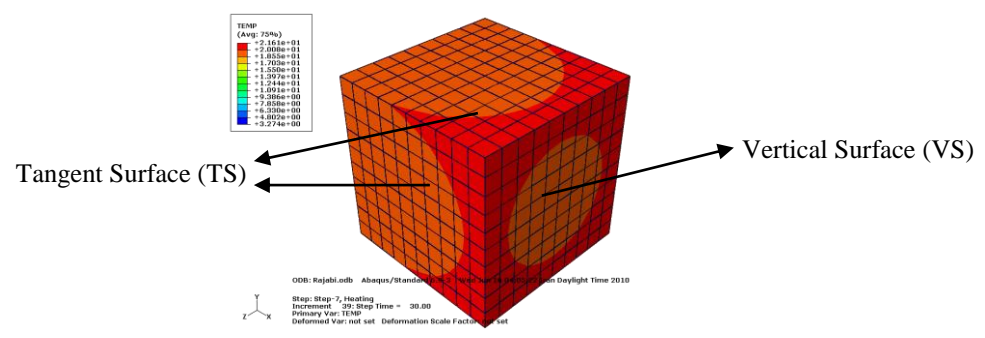
نرم‌افزار مورد استفاده

مدل‌سازی نمونه و شبیه‌سازی شرایط آزمون، توسط نرم‌افزار Abaqus 6.9-3 انجام گرفت و تمامی نمودارها و پروفیل‌های مربوط به توزیع تغییر دما و شار گرمایی در قطعه، توسط همین نرم‌افزار تهیه گردید.

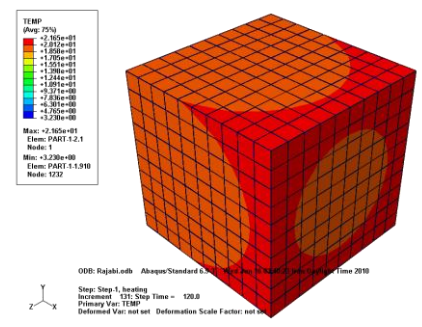
نتایج و بحث

پروفیل‌های توزیع تغییر دما

شکل‌های ۱ و ۲، پروفیل‌های توزیع تغییر دما را به ترتیب در حرارت‌دهی متناوب و مداوم نشان می‌دهند. همان‌طور که از پروفیل‌ها پیداست حداکثر مقادیر تغییر دما در حرارت‌دهی متناوب و مداوم به ترتیب برابر با 21.61°C و 21.65°C و در اطراف لبه‌های مشترک بین VS و TS بود.



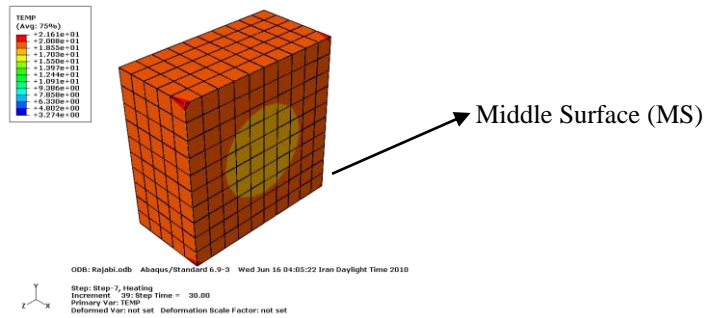
شکل ۱- پروفیل توزیع تغییرات دما در حرارت‌دهی متناوب.



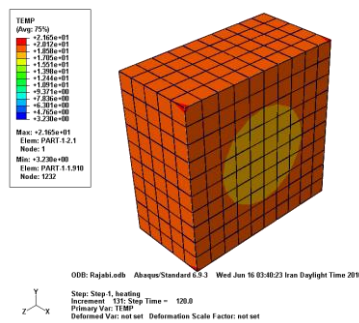
شکل ۲- پروفیل توزیع تغییرات دما در حرارت‌دهی مداوم.

هرچند که طبق انتظار، حداکثر تغییر دما در حرارت مداوم بیش‌تر از حرارت متناوب بود اما تفاوت دو روش، بسیار ناچیز بود. در حالی که انتظار می‌رفت اختلاف، خیلی بیش‌تر باشد. علت این امر احتمالاً به خاطر پایین بودن ضریب انتشار حرارتی قطعه بود. زیرا در روش حرارت متناوب، در زمان‌های توقف، آنچه که باعث افت دما می‌شود انتشار حرارت و تابش و نیز انتقال حرارت به بدنه‌ی خشک‌کن است. در اینجا، قطعه به صورت معلق در نظر گرفته شد و هیچ‌گونه شبیه‌سازی برای بدنه‌ی خشک‌کن و ضریب انتقال هدایتی بدنه در نظر گرفته نشد. بنابراین تنها دلیل ممکن برای اختلاف ناچیز تغییرات دما در دو روش، ناچیز بودن ضریب انتشار حرارتی و ضعیف بودن تابش می‌تواند باشد.

شکل‌های ۳ و ۴، پروفیل‌های توزیع تغییر دما در سطح میانی (MS) را به ترتیب در حرارت‌دهی متناوب و مداوم نشان می‌دهند.



شکل ۳- پروفیل توزیع تغییرات دما در حرارت‌دهی متناوب در سطح میانی (MS).



شکل ۴- پروفیل توزیع تغییرات دما در حرارت‌دهی مداوم در سطح میانی (MS).

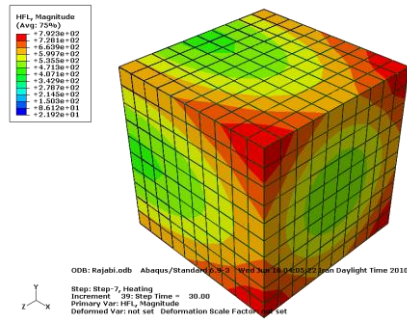
همان‌طور که از پروفیل‌ها پیداست حداکثر مقادیر تغییر دما در حرارت‌دهی متناوب و مداوم به ترتیب برابر با 21.61°C و 21.65°C و در اطراف لبه‌های مشترک بین VS و TS بود. هرچند که طبق انتظار، حداکثر تغییر دما در حرارت مداوم بیش‌تر از حرارت متناوب بود اما تفاوت دو روش، بسیار ناچیز بود. در حالی که انتظار می‌رفت اختلاف، خیلی بیش‌تر باشد. علت این امر احتمالاً به خاطر پایین بودن ضریب انتشار حرارتی قطعه بود. زیرا در روش حرارت متناوب، در زمان‌های توقف، آنچه که باعث افت دما می‌شود انتشار حرارت و تابش و نیز انتقال حرارت به بدنه‌ی خشک‌کن است. در اینجا، قطعه به صورت معلق در نظر گرفته شد و هیچ‌گونه شبیه‌سازی برای بدنه‌ی خشک‌کن و ضریب انتقال هدایتی بدنه در نظر گرفته نشد. بنابراین تنها دلیل ممکن برای اختلاف ناچیز تغییرات دما در دو روش، ناچیز بودن ضریب انتشار حرارتی و ضعیف بودن تابش می‌تواند باشد.

حداقل تغییرات دما در هر دو روش در مرکز مکعب (CMS) و برابر با 15.51°C بود که امری بدیهی و کاملاً منطبق با واقعیت است. هر چه از سطح نمونه به سمت عمق، پیش می‌رویم تغییرات دما کم‌تر است و نیز اختلاف دو روش نیز کاهش می‌یابد که همان‌طور که ذکر شد علت این امر به ناچیز بودن ضریب انتشار حرارتی نمونه بر می‌گردد.

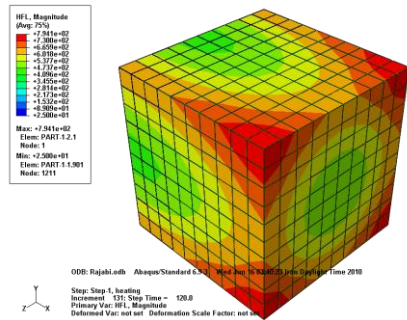
پروفیل‌های توزیع شار گرمایی

شکل‌های ۵ و ۶، پروفیل‌های توزیع شار گرمایی را به ترتیب در حرارت‌دهی متناوب و مداوم نشان می‌دهند.

همان طور که از پروفیل‌ها پیداست حداکثر مقادیر شار گرمایی واحد سطح در حرارت‌دهی متناوب و مداوم به ترتیب برابر با 792.3 W/m^2 و 794.1 W/m^2 و در اطراف گوشه‌های VS بود.

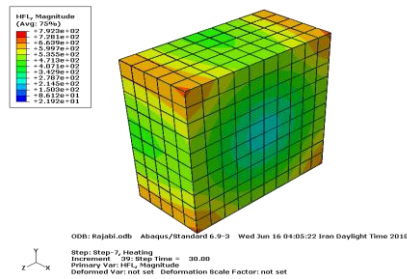


شکل ۵- پروفیل توزیع شار گرمایی در حرارت‌دهی متناوب.

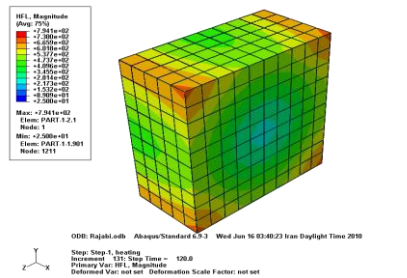


شکل ۶- پروفیل توزیع شار گرمایی در حرارت‌دهی مداوم.

شکل‌های ۷ و ۸، پروفیل‌های توزیع شار گرمایی در سطح میانی (MS) را به ترتیب در حرارت‌دهی متناوب و مداوم نشان می‌دهند.



شکل ۷- پروفیل توزیع شار گرمایی در حرارت‌دهی متناوب در سطح میانی (MS).

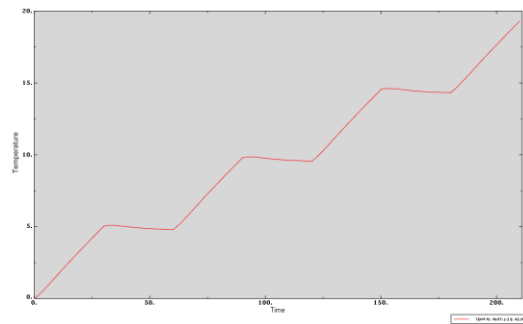


شکل ۸- پروفیل توزیع شار گرمایی در حرارت‌دهی مداوم در سطح میانی (MS).

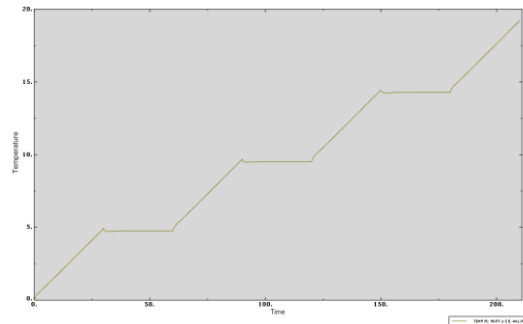
حداقل شار گرمایی در مرکز مکعب (CMS) رخ داد که در حرارت‌دهی متناوب و مداوم به ترتیب برابر با 214.5 W/m^2 و 217.3 W/m^2 بود که امری بدیهی و کاملاً منطبق با واقعیت است. هر چه از سطح نمونه به سمت عمق، پیش می‌رویم مقادیر شار گرمایی کم‌تر است. طبق انتظار، مقادیر شار گرمایی در حرارت متناوب کم‌تر از حرارت مداوم بود اما تفاوت دو روش، بسیار ناچیز بود. در حالی که انتظار می‌رفت اختلاف، خیلی بیش‌تر باشد. علت این امر، مشابهاً به احتمال قوی به خاطر پایین بودن ضریب انتشار حرارتی قطعه بود. زیرا در روش حرارت متناوب، در زمان‌های توقف، انتشار حرارت و تابش باعث می‌شود تا بخشی از شار دریافتی، از دست برود اما در اینجا به دلیل ضعیف بودن انتشار، مقادیر شار در دو روش، تفاوت چندانی نداشتند.

نمودارهای تغییرات دما بر حسب زمان در نقاط مختلف

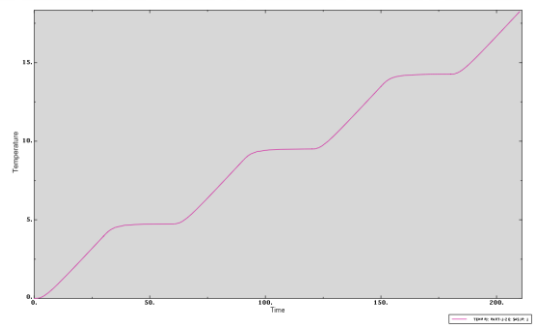
شکل‌های ۹ تا ۱۱، نمودارهای تغییر دما بر حسب زمان را در حرارت‌دهی متناوب، به ترتیب برای CVS، CTS و CMS نشان می‌دهند. با توجه به نمودار تغییر دما در هر دو روش، مشاهده می‌شود که در هر سه نقطه، در زمان‌های حرارت‌دهی، تغییرات دما بر حسب زمان به صورت خطی تغییر می‌کند.



شکل ۹- نمودار تغییر دما بر حسب زمان در حرارت‌دهی متناوب برای CVS.

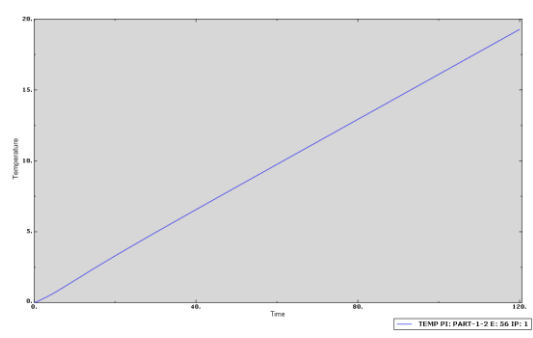


شکل ۱۰- نمودار تغییر دما بر حسب زمان در حرارت‌دهی متناوب برای CTS.



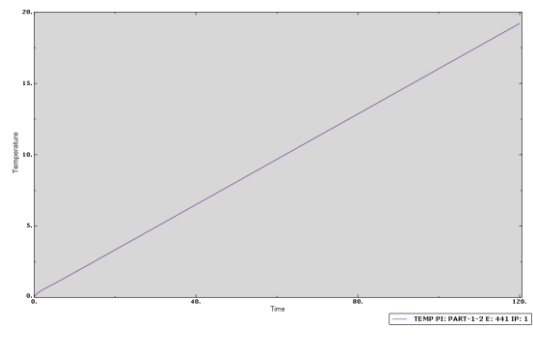
شکل ۱۱- نمودار تغییر دما بر حسب زمان در حرارت‌دهی متناوب برای CMS.

شکل‌های ۱۲ تا ۱۴، نمودارهای تغییر دما بر حسب زمان را در حرارت‌دهی مداوم، به ترتیب برای CVS، CTS و CMS نشان می‌دهند.

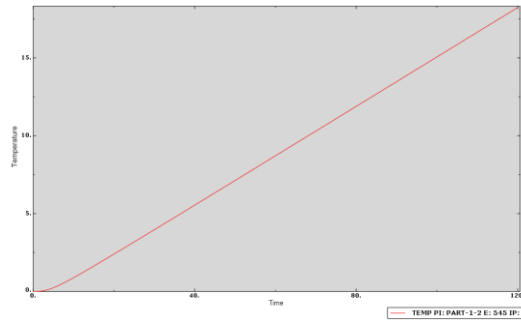


شکل ۱۲- نمودار تغییر دما بر حسب زمان در حرارت‌دهی مداوم برای CVS.

در روش متناوب، در زمان‌های توقف حرارت، نمودار یک روند ثابت را در نقاط CTS و CMS طی می‌کند که امری طبیعی است. اما در نمودار مربوط به CVS در حرارت متناوب در زمان توقف، یک سیر نزولی با شیب خیلی کم مشهود است. هم‌چنین نمودار تغییرات دما بر حسب زمان در CMS، حالت یکنواخت تری را دارا می‌باشد و این امر احتمالاً به این دلیل بود که این نقطه به طور مستقیم در معرض حرارت هوای گرم قرار نداشت.



شکل ۱۳- نمودار تغییر دما بر حسب زمان در حرارت‌دهی مداوم برای CTS.

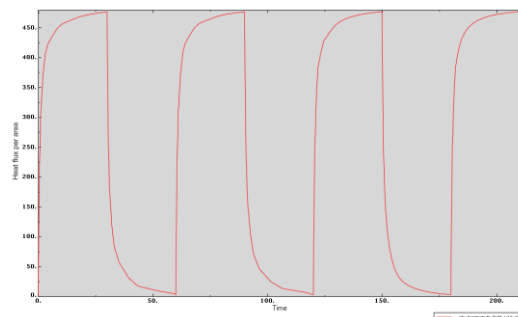


شکل ۱۴- نمودار تغییر دما بر حسب زمان در حرارت‌دهی مداوم برای CMS.

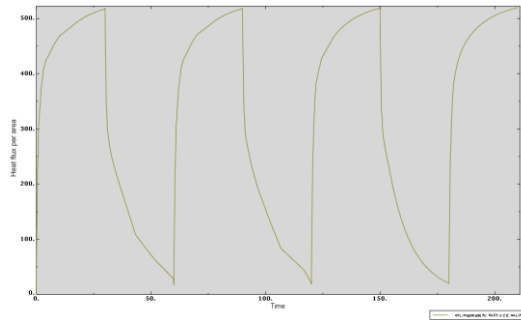
با توجه به نمودار تغییر دما در هر دو روش، مشاهده می‌شود که در هر سه نقطه، در زمان‌های حرارت‌دهی، تغییرات دما بر حسب زمان به صورت خطی تغییر می‌کند. در روش متناوب، در زمان‌های توقف حرارت، نمودار یک روند ثابت را در نقاط CTS و CMS طی می‌کند که امری طبیعی است. اما در نمودار مربوط به CVS در حرارت متناوب در زمان توقف، یک سیر نزولی با شیب خیلی کم مشهود است. هم چنین نمودار تغییرات دما بر حسب زمان در CMS، حالت یکنواخت تری را دارا می‌باشد و این امر احتمالاً به این دلیل بود که این نقطه به طور مستقیم در معرض حرارت هوای گرم قرار نداشت. در روش حرارت مداوم، نمودارها هم از نظر کیفی و هم از نظر کمی، مشابه یکدیگرند. اما در نمودار نقطه‌ی CMS، از نظر کمی، در سطح پایین تری قرار دارد که امری طبیعی است. زیرا این نقطه، یک نقطه‌ی میانی قطعه است و برای این که انتقال حرارت تا این نقطه صورت گیرد نیاز به صرف زمان داشت. این امر در ناحیه‌ی ابتدایی نمودار نیز مشهود است و مویدهمین استدلال می‌باشد. همان طور که پیداست نمودار این نقطه، در ابتدای امر به مدت چند ثانیه شیب صفر دارد و منطبق بر خط صفر تغییر دما است.

نمودارهای شار گرمایی بر حسب زمان در نقاط مختلف

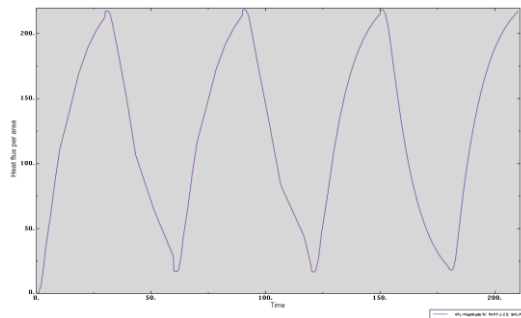
شکل‌های ۱۵ تا ۱۷، نمودارهای تغییر شار گرمایی واحد سطح بر حسب زمان را در حرارت‌دهی متناوب، به ترتیب برای CVS، CMS و CTS نشان می‌دهند.



شکل ۱۵- نمودار شار گرمایی واحد سطح بر حسب زمان در حرارت‌دهی متناوب برای CVS.

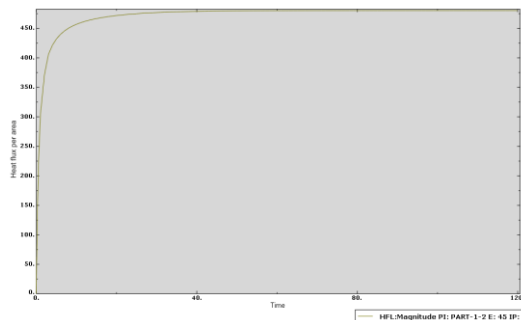


شکل ۱۶- نمودار شار گرمایی واحد سطح بر حسب زمان در حرارت‌دهی متناوب برای CTS.

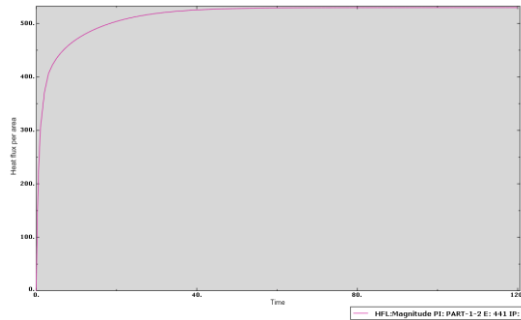


شکل ۱۷- نمودار شار گرمایی واحد سطح بر حسب زمان در حرارت‌دهی متناوب برای CMS.

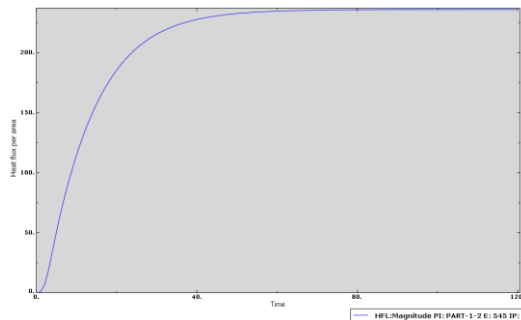
شکل‌های ۱۸ تا ۲۰، نمودارهای تغییر شار گرمایی واحد سطح بر حسب زمان را در حرارت‌دهی مداوم، به ترتیب برای CVS، CTS و CMS نشان می‌دهند. با توجه به نمودارها در روش متناوب، نقاط CVS و CTS، در زمان‌های حرارت‌دهی، افزایش ناگهانی و در زمان‌های توقف حرارت، افت ناگهانی شار گرمایی را تجربه می‌کنند. در نقطه‌ی CMS این افزایش و کاهش شار، وجود دارد اما در سطح کمی، پایین‌تر نسبت به دو نقطه‌ی دیگر (تقریباً نصف) و با نرخ نسبتاً خطی. در مورد پایین بودن سطح کمی شار گرمایی در این نقطه نسبت به دو نقطه‌ی دیگر، امری بدیهی است. اما در مورد تفاوت کیفی نمودار آن، احتمالاً به دلیل تاخیر زمانی در رسیدن شار به این نقطه است. در حالی که در مورد دو نقطه‌ی دیگر، احتمالاً چون در سطح نمونه قرار دارند، به سرعت با برقراری جریان هوا، شار زیادی دریافت می‌کنند و به همین دلیل نیز به همین سرعت با قطع جریان هوا، با کاهش شار مواجه می‌شوند.



شکل ۱۸- نمودار شار گرمایی واحد سطح بر حسب زمان در حرارت‌دهی مداوم برای CVS.



شکل ۱۹- نمودار شار گرمایی واحد سطح بر حسب زمان در حرارت‌دهی مداوم برای CTS.



شکل ۲۰- نمودار شار گرمایی واحد سطح بر حسب زمان در حرارت‌دهی مداوم برای CMS.

در روش حرارت مداوم نیز، نمودارهای نقاط CVS و CTS، از نظر کیفی و کمی، مشابه یکدیگرند و مشابه روش متناوب، در ابتدای امر یک افزایش ناگهانی در شار رخ داد و سپس به طور خیلی ملایم به سمت مقدار حداکثر میل کرد که علت آن نیز می‌تواند همان دلیل ذکر شده برای این پدیده در روش متناوب باشد. اما در نقطه‌ی CMS، این افزایش به طور غیر خطی و از همان ابتدا با شیبی ملایم به سمت حداکثر شار، پیش رفت. که علت این امر نیز مشابه همان است که در این خصوص در روش متناوب ذکر شد.

تشابه نمودارهای شار گرمایی در هر دو روش از نظر کمی، احتمالاً به خاطر ناچیز بودن ضریب انتشار حرارتی بود.

نکته‌ی حائز اهمیت در مورد نمودارهای شار گرمایی در مقایسه با نتایج تجربی به دست آمده توسط محققین دیگر آن است که این نمودارها از نقطه نظر کمی، در تطابق با نتایج تجربی قرار داشتند و از نظر کیفی، در قسمت اول نمودار (فاز افزایشی)، مشابه نمودارهای تجربی اما پس از آن، متفاوت بودند. نتایج آزمایشات تجربی بر روی هویج‌های مکعبی نشان داد که نمودار شار گرمایی بر حسب زمان، پس از رسیدن به یک مقدار حداکثر، به طور غیر خطی نزول کرد و به یک مقدار ثابت میل نمود (نازقلیچی و همکاران، ۱۳۸۹). در حالی که این سیر نزولی در نمودارهای فوق مشاهده نگردید بلکه به یک مقدار ثابت حداکثر میل کردند. علت این امر، ممکن است به منابع خطایی که ذیلاً ذکر می‌شود مربوط باشد. مهم‌ترین و اساسی‌ترین منبع خطای ممکن برای این امر، آن است که در تحلیل نرم‌افزاری، ضریب انتقال حرارت همرفتی (h)، ثابت فرض شد در حالی که در عمل و در واقعیت، چنین نیست و با افزایش دما، مقدار این ضریب کاهش می‌یابد (Holman, 1943).

نتیجه‌گیری



توزیع شار گرمایی در هر دو روش، رفتاری مشابه داشته و حداکثر شارش گرمایی در گوشه‌های مکعب و سپس در نزدیکی لبه‌ها و بعد از آن در نواحی میانی وجوه رخ داد. نتایج به دست آمده به طور کیفی با نتایجی که توسط محققین در آزمایشات تجربی گزارش شد، تفاوت داشت. مهم‌ترین منبع خطا، عدم تغییر شار گرمایی سطحی (Surface Heat Flux) متناسب با تغییرات دما در قطعه بود.

منابع خطایی که احتمال می‌رود باعث تفاوت نتایج نرم‌افزاری و تجربی شده باشند به شرح زیر هستند:

- ثابت بودن و به روز نشدن ضریب انتقال حرارت همرفتی (h) در هر مرحله از شبیه‌سازی، متناسب با افزایش دما در طی فرآیند.
- عدم احتساب تلفات حرارتی هوا قبل از رسیدن به نمونه.
- عدم احتساب انتقال حرارت بین نمونه و بدنه‌ی خشک‌کن.
- عدم احتساب تفاوت ضریب انتقال حرارت همرفتی (h) برای VS در مقایسه با TS.
- وجود خطا در اندازه‌گیری خواص فیزیکی هویج که از طریق جداول مربوطه استخراج گردید.

منابع

حمیدخانی، ب.، حمیدخانی، آ. و برقی، ع. ۱۳۸۹. بهینه‌سازی فرآیند خشک‌کردن پسته از طریق حرارت متناوب. ششمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون. پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران. کرج.

نازقلیچی، ط.، کیانمهر، م.ح. حسن‌بیگی، س.ر. و عسکری، م. ۱۳۸۹. تحلیل اثر ترمودینامیکی برخی متغیرهای خشک شدن در یک خشک‌کن بستر سیال آزمایشگاهی. ششمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون. پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران. کرج.

Aghbashlo, M., Kianmehr, MH. and Arabhosseini, A. 2009. Performance analysis of drying of carrot slices in a semi-industrial continuous band dryer. *Journal of Food Engineering*; 91: 99 – 108.

Akbulut, A. and Durmus, A. 2010. Energy and exergy analyses of thin layer drying of mulberry in a forced solar dryer. *Energy*; 35: 1754 - 1763.

Celma, A.R. and Cuadros, F. 2009. Energy and exergy analyses of OMW solar drying process. *Renewable Energy*; 34: 660 - 666.

Holman, J.P. 2010. *Heat Transfer*. Boston : McGraw Hill Higher Education, McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering. 10th ed. 725 pages.

Perry, R.H. and Green, D.W. 1973. *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (Fifth edition). New York, N.Y., USA: McGraw Hill. pp. 19-3 to 19-9.

Smith, PG. 2007. *Applications of Fluidization to Food Processing*. Blackwell Science. Oxford, UK.

Sitkei, G. 1986. Mechanics of Agricultural Materials. Elsevier, Technology & Engineering. 487 pages.

Stanislawski, J. 2005. Drying of diced carrot in a combined microwave-fluidized bed dryer. Drying Technology; 23(8): 1711 – 1721.

Stroshine, R. 2004. Physical Properties of Agricultural Materials and Food Products. 296 pages.

Syahrul, S., Dincer, I. and Hamdullahpur, F. 2003. Thermodynamic modeling of fluidized bed drying of moist particles. International Journal of Thermal Sciences; 42: 691 – 701.