بررسی تاثیر مقدار فشار محفظه و وزن اولیه محصول بر شاخص‌های خنک‌سازی کلم پیچ به روش خلائی

*سحر راهی [۱]، هوشنگ بهرامی [۲] و محمد جواد شیخ داوودی [۳]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مکانیزاسیون دانشگاه شهید چمران اهواز
۲- دانشیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون دانشگاه شهید چمران اهواز
۳- دانشیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۳۹۲/۰۷/۰۱

پذیرش نهایی:۱۳۹۴/۰۱/۲۰

کلمات کلیدی:
خنک‌سازی خلائی،
کلم‌پیچ،
جرم از دست رفته،
ضریب خنک‌سازی،
فاکتور تأخیر

* **عهده دار مکاتبات**

E-mail: Rahi.sahar1@gmail.com

چکیده

هدف اصلی از روش‌های پیش‌خنک کردن خنک‌سازی سریع محصول قبل از انبار در سردخانه طی ۲٤ ساعت پس از برداشت می‌باشد. خنک‌سازی خلائی به عنوان سریع‌ترین روش خنک-سازی تبخیری برای هر محصولی که دارای رطوبت آزاد است، شناخته شده است. در این مطالعه آزمایشات برای ارزیابی تأثیر فشار محفظه‌ی خلاء در سه سطح ۰/۷، ۱ و ۱/۵ کیلوپاسکال و وزن در دو سطح ۱۰۰±۳۰۰ و ۱۰۰±۹۰۰ گرم بر کاهش دمای سطح و مرکز، ضریب خنک‌سازی، فاکتور تأخیر، زمان خنک-سازی و جرم از دست رفته برای خنک‌سازی کلم‌پیچ انجام شد. نتایج به دست آمده از این مطالعه نشان داد در بین سه سطح فشار هرچه فشار ثابت شده نهایی در محفظه بیشتر و کلم ها سنگین‌تر باشند زمان خنک سازی افزایش، ضریب خنک سازی کاهش و فاکتور تأخیر به طور ناپیوسته افزایش یافت، هم چنین هر چه زمان بیشتری سپری شد کلم ها رطوبت بیشتری از دست دادند. یکی از معایب روش خنک کردن خلاء، از دست دادن رطوبت محصولات می باشد. بنابر نتایج این تحقیق با انتخاب فشار ۰/۷ کیلوپاسکال به عنوان فشار ثابت شده نهایی برای مخزن میزان جرم از دست رفته کمتری وجود داشت. به گونه‌ای که این فشار باعث کاهش ۳۲٪ و ۵۲٪ به ترتیب در مقدار جرم از دست داده در مقایسه با فشار ۱ و ۱/۵ کیلوپاسکال گردید. تأثیر فشار بر خنک سازی محصول کلم بسیار بارزتر از اثر فاکتور دیگر (وزن) بوده است. هم چنین استفاده از این روش موجب توزیع دمایی همگن در کلم‌پیچ در طول فرآیند خنک سازی شد.

مقدمه

افزایش عمر پس از برداشت نیازمند دانشی است که این دانش باید برای ایجاد یک فناوری توانمند که میزان فساد محصول را به کمترین حد می رساند، استفاده شود (۷).

برای محصولاتی که پس از برداشت قابلیت نگهداری کوتاهی دارند (مانند سبزیجات)، باید از پیش خنک‌کردن[1] یا سرد کردن اولیه استفاده کرد (۶). پیش خنک‌کردن حذف سریع دمای مزرعه از میوه‌های تازه برداشت شده قبل از حمل و نقل یا انبار در سردخانه می-باشد. پیش‌خنک‌کردن سریع از رشد میکروارگانیسم-هایی که باعث فساد می‌شوند جلوگیری می‌کند، فعالیت آنزیمی و نرخ تنفس را کاهش می‌دهد (۲). یکی از روش‌هایی که در حال حاضر به طور تجاری در کشور آمریکا برای کاهو و قارچ به کار می‌رود، روش خنک-سازی تحت خلاء[2] می‌باشد (۹). روش خنک‌سازی توسط خلاء برای محصولاتی که به اندازه‌ی کافی آبدار هستند و نسبت سطح به وزن بالایی دارند، کاربرد دارد (۱۳). محققان زیادی معتقدند که این روش برای سبزیجاتی نظیر کاهو، کلم برگی، کلم بروکلی، هویج، کرفس، اسفناج، مارچوبه، ذرت شیرین، نخود سبز، جعفری، گل کلم، تره فرنگی و قارچ قابل انجام است اما این روش در سرتاسر دنیا بصورت تجاری تنها برای محصولات محدودی نظیر کاهو، کلم، کرفس، اسفناج و گل‌های شاخه بریده انجام می‌شود(۱۴). به طور کلی هر محصولی که دارای رطوبت آزاد باشد، چنانچه در محفظه‌ای قرار گیرد که فشار آن توسط پمپ خلاء کاهش یابد، اختلاف فشار بخار بین آب درون محصول و هوای اطراف باعث تبخیر آب شده و بخار ایجاد شده از سطح محصول دور می‌شود. از آن جایی که محصول درون یک سیستم بسته قرار دارد، گرمای نهان مورد نیاز برای تبخیر باید به وسیله‌ی محصول و نه هیچ ماده‌ی واسطه‌ی دیگری تهیه شود. خنک‌سازی تا زمانی‌که فشار توسط پمپ کاهش می‌یابد، ادامه خواهد داشت. دمای نهایی محصول را می‌توان با تنظیم فشار بخار نهایی درون محفظه که معمولا″ کمتر از ۶/۵ میلی بار (۴/۹۴ میلی متر جیوه) نیست، به دقت کنترل کرد (۱۲).

از دست دادن رطوبت در این روش علاوه بر کاهش کیفیت محصول از نظر اقتصادی نیز مهم است، زیرا محصول با توجه به وزنش به فروش می‌رسد (۱).

ژانگ[3] و سان[4] (۱۷) آزمایشاتی روی چهار روش خنک کردن شامل خنک کردن خلائی، اتاق سرد، خنک‌کردن با هوای سرد و سینی‌های سرد (در تونل سرد کننده) برای بروکلی پخته شده و قطعات هویج انجام دادند. بهره‌وری خنک‌کردن و کیفیت سبزی‌ها در چهار روش پس از خنک‌کردن مقایسه شد. نتایج نشان داد که خنک‌کردن در خلاء بیشترین بهره وری را بین چهار روش داشت. اتلاف وزن طی روش خنک‌کردن در خلاء بطور قابل ملاحظه‌ای توسط اسپری کردن آب روی سبزیجات کاهش یافت و این روش در مقایسه با سه روش دیگر هیچ اثر منفی روی کیفیت محصولات نداشت (۱۷).

اوزتورک[5] و اوزتورک (۱۶) در طی پژوهشی به این نتیجه رسیدند که از دست دادن وزن در فشار خلاء پایین، بالا می‌باشد و به عبارت دیگر برای فشارهای خلاء بالا رسیدن به دمای بسته بندی مناسب، از دمای ۵ درجه سلسیوس به پایین‌تر امکان پذیر نیست. در روش سرد کردن خلائی فشار در مرکز و سطح کاهو بسیار شبیه به هم است، در حالیکه در روش‌های متداول سرد کردن دمای سطح کاهو سریع‌تر از مرکز کاهو کاهش می‌یابد. همچنین برای دماهای پایین نظیر ۱۶- یا ۲۰- درجه سلسیوس سطح کاهو یخ می‌زند که مطلوب نیست. خنک‌کردن در خلاء در فشار ۰/۷ کیلو پاسکال برای

1- Precooling
2- Vacuum cooling
3- Zhang
4- Sun
5- Ozturk

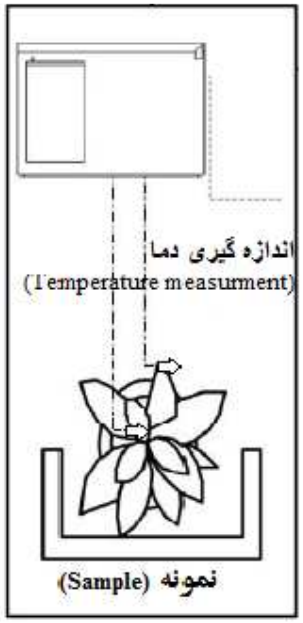
رسیدن کاهو به دمای ۵ درجه سلسیوس، ۱۱/۵ دقیقه سریع‌تر از سرد کردن مرسوم در ۲ درجه سانتیگراد است. اتلاف وزن نیز در فشار فوق ۳/۵٪ در روش خنک‌کردن خلاء در مقایسه با ۲/۴٪ در دمای ۶ درجه سلسیوس در روش مرسوم بود (۱۶).

در تحقیق حاضر هدف تعیین نحوه‌ی تأثیر فشار سیستم و وزن اولیه‌ی کلم‌پیچ بر فاکتورهای خنک‌سازی کلم‌پیچ به روش خلاء به عنوان تکنیکی مناسب و کارا جهت نگهداری این محصول و سبزیجات مشابه در ایران می‌باشد.

مواد و روش‌ها

برای هر آزمایش محصول مورد نیاز (کلم پیچ سفید) در روز آزمایش خریداری شد. به علت فسادپذیری سریع این محصول، نمونه‌هایی که کمتر از ۲۴ ساعت از برداشت آن‌ها می‌گذشت انتخاب شد. نمونه‌های مورد آزمایش دو ساعت در یک اتاق قرار داده شدند تا دمای کل محصول کاملا" یکنواخت و نزدیک به دمای محیط (۳۰ درجه سلسیوس) باشد. عملیات خنک‌سازی روی آن‌ها به وسیله‌ی یک دستگاه خنک‌کن خلائی در مقیاس آزمایشگاهی موجود در کارگاه گروه آموزشی مهندسی مکانیک ماشین های کشاورزی و مکانیزاسیون دانشگاه شهید چمران اهواز، انجام شد. اجزاء اصلی دستگاه شامل محفظه‌ی استوانه‌ای خلاء به حجم m^3 ۰/۳۳۵ و یک پمپ خلاء (مدل پیستونی) می‌باشد. درون محفظه استوانه‌ای تعدادی میله به طور افقی و موازی با هم جهت قرار دادن محصول تعبیه شده است. قطر داخلی محفظه استوانه‌ای شکل ۱۰۰ cm می‌باشد. از چندین سنسور دما (سنسور دیجیتال TPM-10 برای دامنه دما بین ۵۰- تا ۷۰ درجه سلسیوس با دقت ۱± درجه سلسیوس، ساخت کانادا) برای اندازه گیری دمای مرکز و سطح محصول و همچنین دمای محفظه استفاده گردید. سنسورها از قسمت فوقانی وارد کانال دستگاه شدند و تمام فضاهای خالی که امکان ورود و خروج هوا از آنها وجود داشت بوسیله‌ی چسب آکواریوم کاملا" درزبندی شد. همچنین رطوبت کانال با استفاده از یک رطوبت سنج دیجیتال (سنسور HC838/101 مخصوص برای دامنه رطوبت ۰ تا ۱۰۰ درصد با دقت rh ۱٪، با مشخصات فنی: AC,DC 100-265v/50-60 H و خروجی RELAY N.O/N.C 5A، ساخت ایران) اندازه‌گیری شد. قابل ذکر است فشار محفظه‌ی خلاء به واسطه‌ی خلاء سنج موجود روی دستگاه به طور مداوم چک گردید. با توجه به اینکه طی فرآیند خنک‌سازی خلاء در راستای جلوگیری از یخ زدن و آسیب‌های احتمالی ناشی از سرما به محصول، فشار نباید کمتر از ۶/۵ میلی بار باشد و از طرفی با توجه به فشارهای معمول اعمال شده برای محفظه و محصولات مختلف تاکنون، عامل فشار سیستم در سه سطح (۰/۷، ۱، ۱/۵ کیلوپاسکال) انتخاب گردید. در این پژوهش اثر عامل فشار در سه سطح و عامل وزن در دو سطح (کوچک (۱۰۰±۳۰۰) گرم و بزرگ (۱۰۰±۹۰۰) گرم) بر فاکتورهای زمان خنک‌سازی، ضریب خنک‌سازی، درصد جرم از دست رفته و فاکتور تأخیر بررسی شد. این آزمایش با در نظر گرفتن ۶ ترکیب تیماری و ۳ تکرار در مجموع ۱۸ واحد آزمایشی داشت. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملا" تصادفی انجام شد. سعی شد خصوصیات ظاهری (از لحاظ شکل، اندازه، وزن و رنگ) سه عدد محصول برای هر واحد آزمایشی بسیار مشابه باشد و شماره-گذاری شدند. سه کلمی که برای هر آزمایش به کار برده شد کاملا" تازه بوده و قبلا هیچ عملیات خنک‌سازی روی آن‌ها صورت نگرفته بود. برای اندازه‌گیری دمای مرکزی، یک لوله باریک که قطر آن بیشتر از قطر سیم سنسور بود تا یک دوم میانی در مرکز هر کلم قرار داده شد.

سپس سنسور از مسیر باز شده توسط میله، در مرکز هر کلم قرار گرفت (شکل ۱). همچنین برای اندازه‌گیری دمای سطح محصول یک سنسور زیر اولین برگ کلم قرار داده شد. جرم کلم تحت آزمایش قبل و بعد از آزمایش با ترازوی دیجیتال (با دقت ۰/۰۱ گرم) اندازه‌گیری شد. کلم‌ها برای تکرارهای مختلف تا حد امکان مشابه هم و در قسمت مرکزی محفظه خلاء قرار داده شدند.



شکل (۱) نحوه‌ی قرارگیری سنسورهای دما در نمونه‌ی آزمایشی

Figure (1) The measured position of the sample by temperature sensors

از آنجا که دمای توصیه شده برای انبارداری صحیح کلم‌پیچ ۷ درجه سلسیوس اعلام شده است (۱۵)، در طول آزمایش تا زمان رسیدن به این دما، دمای مرکز و سطح محصول، دما و رطوبت محفظه‌ی خلاء، فشار محفظه و زمان رسیدن به دمای ۷ درجه سلسیوس در فواصل ۴ دقیقه ای قرائت و یادداشت شد.

سرعت سرد شدن را معمولا با "زمان نیم خنک‌سازی" [۱] (Z) یا "ضریب سردشدن" [۲] (C) نشان می دهند. زمان نیم خنک‌سازی، مدت زمان لازم برای رساندن اختلاف دمای محصول با محیط سرد کننده، به یک دوم اختلاف اولیه است. زمان نیم خنک‌سازی، از نظر تئوری مستقل از دمای اولیه محصول است و در طول سرد کردن ثابت باقی می ماند. رابطه ریاضی Z و C به شکل زیر است : (۳)

$$Z = \mathrm{Ln}\frac{0/5}{C} \qquad (۱)$$

که در این رابطه C از معادله ی $C = \mathrm{Ln}\frac{Y}{\theta}$ بدست می آید که در این معادله θ زمان خنک‌سازی قرائت شده Y نسبت دما می‌باشد (رابطه ۲) (۱۰).

$$y = \frac{T - Tm}{Ti - Tm} \qquad (۲)$$

T_m= دمای وسیله ی خنک سازی (°C)

T_i= دمای درونی محصول (°C)

T= دمای سطح محصول (°C)

وزن محصول را بعد و قبل از خنک کردن خلاء به وسیله ترازوی دقیق اندازه می گیریم و با استفاده از فرمول زیر درصد وزن از دست داده محاسبه می شود: (۵)

$$WL\% = \frac{W_b - W_a}{W_b \times 100} \qquad (۳)$$

W_b= وزن محصول قبل از سرد کردن (gr)

W_a= وزن محصول بعد از سرد کردن (gr)

به طور کلی روند منحنی خنک‌سازی در مقابل زمان، به صورت یک تابع نمایی می‌باشد (۴).

$$y = j\exp(-ct) \qquad (۴)$$

C= ضریب خنک‌سازی (1/s)

j= فاکتور تاخیر (بی بعد)

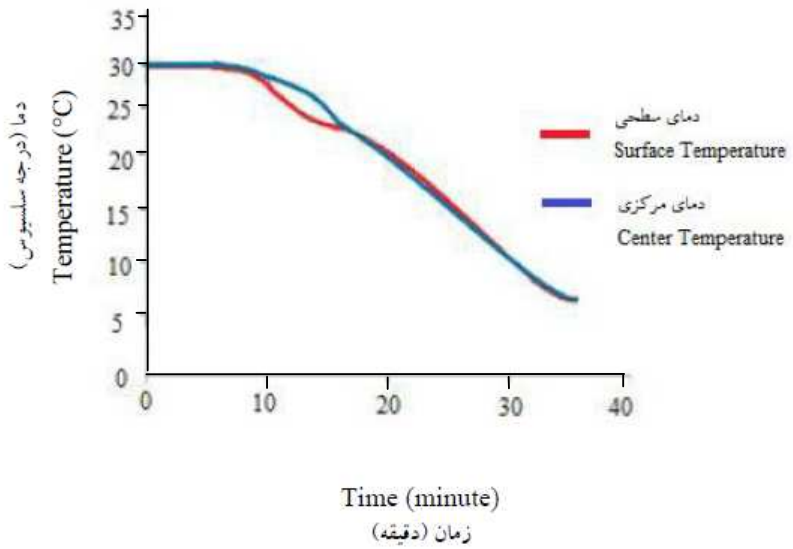
t= زمان (s)

1- Half cooling time
2- Cooling coefficient

با برازش یک منحنی نمایی به داده‌های تجربی (منحنی تغییرات دمای بی بعد نسبت به زمان)، فاکتور تأخیر به دست می‌آید. ابتدا اطلاعات به دست آمده از آزمایشات به نرم افزار اکسل (۲۰۱۰) منتقل شد و سپس ضریب خنک‌سازی، جرم از دست رفته و زمان خنک-سازی نیز محاسبه شده و با استفاده از نرم افزار MSTATC تجزیه و تحلیل آماری انجام شد. در این پژوهش دسته‌بندی داده‌ها و اطلاعات جمع‌آوری شده از آزمایش‌ها و همچنین ارائه نتایج به صورت گراف و نمودار به کمک نرم افزار Excel انجام گرفت.

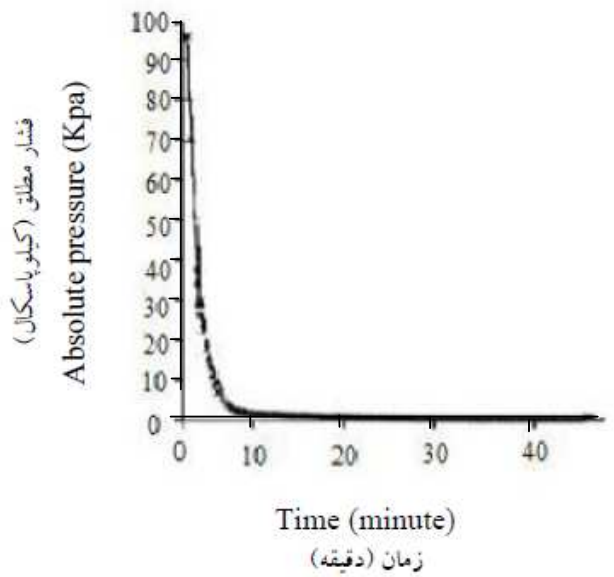
تحلیل نتایج

منحنی خنک‌سازی برای همه فاکتورها در تمامی سطوح (سه سطح فشار و دو سطح وزنی) روند مشابهی داشت. بعد از یک تأخیر اولیه دمای مرکز محصول به صورت نمایی کاهش پیدا کرد. شکل ۲ تغییرات دمای سطح و مرکز را نسبت به زمان در فشار ۰/۷ کیلو پاسکال برای کلم‌هایی با وزن ۱۰۰±۳۰۰ و دمای ۳۰ درجه سلسیوس نشان می‌دهد. فشار بخار اشباع، فشاری است که بخار آب در تعادل ترمودینامیکی و در آستانه چگالش است. در فشارهای بالاتر چگالش رخ خواهد داد. در این فرآیند انرژی نهان بخار آزاد می‌شود، گرما به سطح انتقال می‌یابد، و مایع چگالیده بوجود می-آید. همانند مواد دیگر، فشار بخار اشباع تابعی از دما است.

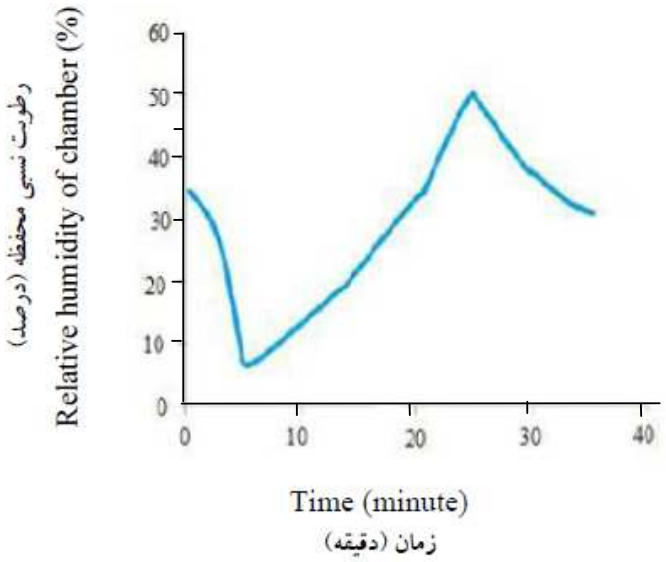


شکل (۲) نمودار تغییرات دما نسبت به زمان در فشار ۰/۷ کیلو پاسکال برای کلم‌هایی با وزن ۱۰۰±۳۰۰ و دمای ۳۰ درجه سلسیوس

Figure (2) Variation of cabbage temperature with time for set pressure of 0.7 Kpa, weights of 300±100 and temperatures



شکل (۳) نمودار تغییرات فشار (۰/۷ کیلوپاسکال) در
محفظه‌ی خنک‌کن خلاء در طی فرآیند خنک‌سازی برای کلم‌هایی با وزن ۱۰۰±۳۰۰ و دمای ۳۰ درجه سلسیوس
Figure (3) Variation of vacuum chamber pressure with time for set pressure of 0.7 Kpa for cabbages with weights of 300±100 and temperature of 30 °C during vacuum cooling



شکل (٤) نمودار تغییرات درصد رطوبت محفظه‌ی خنک‌کن در حین فرآیند خنک‌سازی
Figure (4) Variation of relative humidity of vacuum chamber during vacuum cooling

قبل از خلاء فشار درون محفظه پایین‌تر یا مساوی با فشار اشباع در دمای موضعی کلم یعنی فشاری است که بخار آب موجود در کلم در تعادل ترمودینامیکی با دمای موضعی کلم می‌باشد. با شروع به کار دستگاه و کاهش فشار در محفظه‌ی خلاء، زمان آغاز تبخیر رطوبت از

محصول مورد نظر نقطه‌ی اشتعال[1] خوانده می‌شود، که آغاز لحظه‌ی خنک‌سازی می‌باشد. به طور مثال، برای شکل ۲، زمان رسیدن به نقطه‌ی اشتعال بعد از گذشت ۵ تا ۶ دقیقه‌ی اول آزمایش بود، زیرا تا آن زمان دمای مرکز و سطح هیچ تغییری نداشت. بعد از شروع چند دقیقه از آغاز بکار خنک‌سازی، دمای سطح و مرکز کاهش یافت، اما عموماً در همان ابتدای شروع کاهش دما به دلیل گرادیان دمایی درون کلم دمای سطح و مرکز به طور غیر یکنواخت کاهش می‌یابد. با گذشت زمان یکنواختی بیشتری ایجاد شده و در نهایت دمای مرکز و سطح همزمان کاهش یافت. دلیل دیگر برای سریع‌تر کاهش یافتن دمای سطح نسبت به مرکز، اثر خنک‌کنندگی است که از تبخیر رطوبت نمونه‌ها می‌آید. این نتایج توسط نتایج تحقیق جین[2] (۸) و مک دونالد[3] (۱۱) تأیید می‌شود. بنابراین تبخیر و سرد شدن نمونه‌ها از سطح شروع می‌شود. سایر نمودارهای تغییرات دما به زمان برای تیمارهای مختلف از همین روند تبعیت می‌کنند با این تفاوت که زمان کل فرآیند خنک‌سازی بر حسب مورد (فشار و وزن کلم‌ها) متفاوت می‌باشد.

فشار خلاء (در هر ۳ مقدار) در محفظه‌ی خلاء به سرعت از فشار اتمسفر تا ۱/۹۶۹ کیلوپاسکال در مدت ۳۰۰ ثانیه (۵ دقیقه) کاهش یافته و سپس به آرامی کاهش میابد(شکل۳). وقتی فشار کمتر یا برابر با فشار اشباع شدرطوبتشروع به تبخیر می‌کند. این اتفاق با توجه به مقایسه نمودارهای تغییرات دما و فشار بعد از ۶ تا ۷ دقیقه اتفاق افتاد، در این زمان دما براساس تغییرات فشار تقریباً به سرعت کاهش می‌یابد تا زمانیکه فشار به فشار ثابت می‌رسد و شروع به نوسان در اطراف آن مقدار ثابت می‌کند و در حقیقت به نوعی فرآیند خنک‌سازی به ثبات می‌رسد. در این حالت کاهش دمای محصول کندتر صورت گرفته و تا زمانی که به دمای خواسته شده برسد ادامه پیدا می‌کند. درحقیقت براساس تغییرات فشار می‌توان دو دوره را برای خنک‌سازی کلم در نظر گرفت: دوره‌ی تغییرات سریع دما (دوره‌ی شتاب) و دوره‌ی تغییرات کند دما (دوره‌ی تنزیل).

شکل ۴ تغییرات رطوبت محفظه خلاء را در طول فرآیند نشان می‌دهد. در ۵ دقیقه‌ی ابتدای فرآیند رطوبت محفظه با توجه به مکش فشار داخل محفظه کاهش پیدا کرده و در ادامه فرآیند در طول زمان اصلی خنک‌سازی با توجه به تبخیر رطوبت از نمونه‌ها، رطوبت محفظه نیز افزایش پیدا می‌کند، سپس در انتهای فرآیند به دلیل نوسان فشار در اطراف یک مقدار خاص روند کاهش دمای محصول بیشتر ناشی از ثابت شدن در شرایط خاص محفظه می‌باشد. بر این اساس تبخیر رطوبت پایان یافته و به سبب باز کردن شیر تنظیم فشار و ورود هوای اضافی به درون مخزن رطوبت به بیرون منتقل شده، در نتیجه نرخ رطوبت دوباره کاهش می‌یابد تا زمانی که دستگاه خاموش شود.

جدول ۱ تجزیه واریانس اثر فشار محفظه و وزن کلم را بر شاخص‌های خنک‌سازی نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود بر اساس نتایج حاصله در جدول ۱ در گروه اثر فشار تمام فاکتورهای مورد بررسی در سطح ۱ درصد معنی دار شده است. اثر عامل وزن و اثرات متقابل فشار در وزن بر ضریب خنک سازی تأثیر معنی دار نداشت، در حالیکه زمان خنک‌سازی، درصد جرم از دست رفته و فاکتور تأخیر در تمامی سطوح در سطح ۱ درصد معنی دار شده است.

بدیهی است به دلیل معنی‌دار شدن اثر متقابل تیمارها، نتیجه‌گیری بر این اساس از اعتبار بیشتری برخوردار است، بنابراین تجزیه واریانس اضافی نیز انجام شد. نتایج مقایسه میانگین ضریب خنک سازی در سه سطح فشار در جدول ۲ و شاخص‌های خنک‌سازی در اثر متقابل سه سطح فشار و دو سطح وزنی در جدول ۳ ارائه شده است.

1- Flash point
2- Jin
3- Mc Donald

جدول (۱) تجزیه واریانس اثر فشار محفظه‌ی خلاء، و وزن اولیه کلم بر شاخص‌های خنک‌سازی

Table (1) Analysis of variance of vacuum chamber pressure and weight of cabbage on cooling indices

منابع تغییرات (Source of Variation)	درجه آزادی (Degree of freedom)	میانگین مربعات (Mean square) زمان خنک‌سازی (ثانیه) (Cooling time) (second)	ضریب خنک‌سازی (یک بر ثانیه) (Cooling coefficient) (1/s)	جرم از دست رفته (٪) (Mass of loss) (percent)	فاکتور تأخیر (Lag factor)
فشار (Pressure)	2	419.80^{**}	5.27^{**}	92.80^{**}	2555.68^{**}
وزن (Weight)	1	113.87^{**}	$3.41^{n.s}$	74.39^{**}	1736.90^{**}
فشار × وزن (Interaction of pressure and weight)	2	364.90^{**}	$0.86^{n.s}$	3.46^{*}	1476.99^{**}
خطای آزمایش (Error)	12	12.33	10.35	4.36	0.26
کل (Total)	17				

*, **, n.s به ترتیب به مفهوم معنی دار در سطوح احتمال ۵ و۱ درصد و غیر معنی دار

*, **, n.s: Significant at 5 and 1% probability levels and non-significant, respectively

جدول (۲) مقایسه میانگین اثر فشار محفظه‌ی خلاء بر ضریب خنک‌سازی

Table (2) Duncan mean comparison of vacuum chamber pressure on cooling rate

فشار (کیلوپاسکال) (Pressure) (Kpa)	ضریب خنک‌سازی (یک بر ثانیه) (Cooling coefficient) (1/s)
0.7	0.008189^{a}
1	0.006250^{b}
1.5	0.005294^{b}

جدول (۳) مقایسه میانگین اثر فشار محفظه‌ی خلاء، و وزن کلم بر شاخص‌های خنک‌سازی

Table (3) Duncan mean comparison of vacuum cooling pressure and weight of cabbage on cooling indices

وزن (گرم) (Weight) (gr)	فشار (کیلوپاسکال) (Pressure) (Kpa)	زمان خنک‌سازی (ثانیه) (Cooling time) (second)	جرم از دست رفته (٪) (Mass of loss) (percent)	فاکتور تأخیر (بی‌بعد) (Lag factor)
300±100	0.7	46.40^{a}	7.35^{a}	10.03^{a}
	1	56.00^{b}	10.18^{a}	12.58^{a}
	1.5	51.70^{b}	15.09^{b}	18.14^{b}
900±100	0.7	59.00^{a}	10.12^{a}	8.07^{a}
	1	71.30^{b}	15.72^{b}	28.66^{c}
	1.5	120.30^{c}	21.38^{c}	21.44^{b}

ضریب خنک‌سازی براساس رابطه‌ی ۱ به دست آمد. ضریب خنک‌سازی تابعی از خواص فیزیکی و حرارتی محصول می‌باشد. تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای مختلف وزن اولیه از لحاظ تأثیر بر ضریب خنک‌سازی مشاهده نشد.

در حقیقت این ضریب به طور معنی‌داری تأثیر قابل وضوحی از جرم نمونه‌ها نداشت. چرا که به طور عمومی ضریب خنک‌سازی از فاکتورهای دیگری نظیر خلل و فرج، مساحت یا سطح انتقال جرم برای تبخیر آب که شامل ترک خوردگی‌های درونی نمونه‌ها یا نواحی سوراخ و روزنه‌های روی سطح محصول است، تأثیر می‌پذیرد.

نتایج مقایسه ضریب خنک‌سازی (یک بر ثانیه) در سه سطح فشار نشان داد در بین سه سطح عامل فشار، سطح ۰/۷ کیلو پاسکال نسبت به دو سطح دیگر دارای بیشترین ضریب خنک سازی بود. به بیانی دیگر این سطح از فشار باعث افزایش ۳۱ درصدی نسبت به فشار ۱ کیلو پاسکال و افزایش ۵۴ درصدی نسبت به فشار ۱/۵ کیلو پاسکال در ضریب خنک‌سازی شد. مقدار ضریب خنک‌سازی برای فشارهای ۱ و ۱/۵ بسیار نزدیک به هم و دارای تفاوت زیاد با فشار ۰/۷ کیلوپاسکال بود که این امر انتخاب مناسبترین فشار (۰/۷ کیلوپاسکال) را برای بهبود فرآیند و اثربخشی آن بر سرعت خنک‌سازی، تایید می‌کند. نتایج نشان می‌دهد اختلاف معنی‌داری بین سطوح مختلف فشار محفظه در دو سطح وزنی محصول کلم وجود دارد. هرجند به طور کلی تأثیر فشار ۰/۷ کیلو پاسکال بر کاهش زمان خنک‌سازی به ترتیب ۱۷ درصد و ۳۹ درصد بیشتر نسبت به فشار ۱ و ۱/۵ کیلو پاسکال می‌باشد اما بررسی‌ها نشان داد در سطح وزنی کلم‌های کوچک فشار ۱ و ۱/۵ کیلوپاسکال به طور تقریبی طول مدت یکسانی در خنک‌سازی داشتند. حروف لاتین در جدول تفاوت معنی دار آماری را بین تیمارهای مختلف فشار نشان می‌دهد. هرچند با کاهش فشار، تبخیر و سرد شدن کلم با کاهش دما همزمان اتفاق می‌افتد زمان خنک‌سازی کل به شکل محصول، خلل و فرج، سایز روزنه‌ها، توزیع روزنه‌ها در نمونه‌ها، رطوبت آزاد موجود در روزنه‌ها

و فشار ثابت دارد. آنچه از جداول حاکی است نشان می‌دهد که زمان خنک‌سازی برای فشارهای پایین‌تر کوتاه‌تر است.

در طی خنک‌سازی خلائی تبخیر آب اجتناب ناپذیر و ضروری است، بنابراین اتلاف وزن ناشی از تبخیر در حین خنک‌سازی بسیار بالاتر از سایر شیوه-های خنک‌سازی است که توسط سایر محققان نیز تایید شده است (۱۱). مقایسه جرم از دست رفته (درصد) در دو سطح وزنی (کوچک و بزرگ) و سه سطح فشار ۰/۷، ۱ و ۱/۵ (کیلوپاسکال) در جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج حاکی از آن است که استفاده از فشار ۰/۷ کیلو پاسکال باعث شد نمونه‌ها جرم کمتری از دست بدهند و در نتیجه تازگی بیشتری در انتهای فرآیند داشته باشند، با توجه به اینکه جرم از دست داده تأثیر مستقیم بر رطوبت محصول و از جهت دیگر اثر مستقیم بر طراوت محصول دارد، مشاهده شد که فشار ۱/۵ کیلو پاسکال باعث از دست رفتن رطوبت زیادی از محصول در هر دو سطح وزنی شده و مناسب نمی‌باشد. در فشارهای پایین‌تر تبخیر با سرعت بیشتری انجام می-گردد، در نتیجه اگرچه میزان جرم از دسته رفته در واحد زمان (گرم بر هر ثانیه که فرآیند خنک شدن در حال انجام است) بیشتر می‌باشد، اما به دلیل زمان کمتری که رسیدن به دمای ۷ درجه سلسیوس (زمان مورد نظر برای انبارداری صحیح محصول کلم در آزمایش مذکور) به طول می‌انجامد، میزان جرم از دسته رفته‌ی کل بر واحد زمان (گرم بر کل زمان خنک شدن) در فشار ۰/۷ نسبت به فشارهای ۱ و ۱/۵ کیلو پاسکال کمتر است.

درصد جرم از دست رفته، بین فشار ۰/۷ کیلو پاسکال برای دو سطح وزن تفاوت معنی‌داری نداشت، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در فشار ۰/۷ کیلو پاسکال

کوچک و بزرگ بودن نمونه‌ها تأثیری بر میزان درصد جرم از دست رفته نخواهد گذاشت. که در این سطح از فاکتورهای فشار و وزن به طور تقریبی به ازای ۶/۷ درجه سلسیوس کاهش دما و اثر خنک کنندگی، ۱٪ اتلاف وزن وجود داشته است که بسیار مطلوب است. که با نتایج اوزتورک و اوزتورک (۱۶) کاملا" همخوانی داشت.

فاکتور تأخیر تابعی از خواص فیزیکی (شکل و اندازه) و خواص حرارتی محصول می‌باشد. اعمال فشار ۰/۷ کیلو پاسکال به عنوان فشار ثابت و نهایی در محفظه باعث کاهش چشم‌گیری در فاکتور تأخیر گردیده است. در مقایسه با دو فشار دیگر، فشار ۱/۵ مقدار فاکتور تأخیر را در حدود ۲۵ درصد افزایش داد اما براساس نتایج بدست آمده متغیر بودن فاکتور تأخیر و تأثیر پذیری از فاکتور وزن ناپیوسته

و تابع شرایط خاصی نمی‌باشد، در نتیجه هرچند کمترین میزان این فاکتور برای فشار ۰/۷ کیلو پاسکال و وزن ۱۰۰±۹۰۰ گرم به دست آمد اما در رابطه با فاکتور تأخیر و وزن نمی‌توان فرمول خاصی ارائه داد.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه تأثیر سه فشار خلاء متفاوت و دو سطح وزن بر جرم از دست داده، زمان خنک‌ساز ی و ضریب خنک‌سازی برای خنک‌کردن خلائی کلم مورد بررسی قرار گرفت. منحنی خنک‌سازی برای همه‌ی فاکتورها در تمامی سطوح روند مشابهی داشت. بعد از یک تأخیر اولیه دمای مرکز محصول به صورت نمایی کاهش پیدا می‌کند. نتایج نشان داد که بکار بردن روش خنک‌سازی خلاء موجب توزیع دمایی همگن در طول فرآیند شد. همچنین نتایج به دست آمده از این مطالعه تأیید می‌کند هرچه فشار ثابت شده‌ی نهایی در محفظه بیشتر و کلم‌ها سنگین‌تر باشند، زمان خنک‌سازی و جرم از دست رفته افزایش و ضریب خنک‌سازی کاهش می‌یابد. هر چه زمان بیشتری سپری شود کلم‌ها رطوبت بیشتری از دست می‌دهند. بنابر نتایج این تحقیق با انتخاب فشار ۰/۷ کیلوپاسکال به عنوان فشار ثابت شده‌ی نهایی برای مخزن میزان درصد جرم از دست رفته‌ی کمتری خواهیم داشت. به گونه ای که این فشار باعث کاهش ۳۲٪ و ۵۲٪ به ترتیب در

مقدار جرم از دست داده در مقایسه با فشار ۱ و ۱/۵ کیلوپاسکال گردید. در حقیقت درصد حاصل شده از محصول و جرم از دست رفته به طور معناداری با تنظیم فشار بهبود بخشیده شد.

با توجه به اینکه دمای بالا یکی از دلایل اصلی زوال و خرابی محصولات تازه، حاوی مقادیر بالای رطوبت می‌باشد. تکنیک خنک‌کردن خلاء به عنوان یکی از تکنیک‌های سریع پس از برداشت برای به تأخیر انداختن زوال محصولات کشاورزی توسط فرایندهای بیولوژیکی پیشنهاد می‌شود. هرچند این روش در حال حاضر در میان کشاورزان و در کشور ما ناشناخته و جدید می‌باشد، لیکن امید است با انجام تحقیقات بیشتر زمینه‌ی اجرای این روش توسط دست اندرکاران کشاورزی فراهم گردد.

منابع

1. Ashrae handbook. 2006. Heating and cooling. Vol. 1, first ed., SI Edition, New York, 250 pp.

2. Brosnan, T. and Sun, D.W. 2000. Precooling techniques and applications for horticultural products. International Journal of Refrigeration, 24: 154-170.

3. Barati, E. and Esfahani, J.A. 2011. A new solution approach for simultaneous heat and mass transfer during convective drying of mango. Journal of Food Engineering, 102: 302-309

4. Dincer, I. 1994. Air Flow Precooling of Individual Grapes. Journal of Food Engineering, 26: 243-240.

5. Guemes, D.R., Pirovani, M.E., Pentima, J.H.D. 1988. Heat transfer characteristics during air Precooling of strawberries. International Journal of Refrigeration, 12: 169-173.

6. He, S.Y., Feng, G.P., Yang, H.S., Wub, Y., and Lib, Y.F. 2004. Effects of pressure reduction rate on quality and ultrastructure of iceberg lettuce after vacuum cooling and storage. Postharvest Biology and Technology, 33: 263–273.

7. He, S.Y., Zhang, G.C., Yu, Y.Q., li, R.G., and Yung, Q.R. 2013. Effects of vacuum cooling on the enzymatic antioxidant system of cherry and inhibition of surface-borne pathogens. International Journal of Refrigeration, 36: 2387-2394.

8. Jin, T.X. 2007. Experimental investigation of the temperature variation in the vacuum chamber during vacuum cooling. Journal of Food engineering, 78: 333–339.

9. Kim .B,S and Nowak,J. 1995.Freshness prolongation of crisphead lettuce by vacuum cooling. Agricultural Chemistry and Biotechnology, 38: 239-247.

10. Meydani, J. and Hashemi Dezfouli, A. 1998. Post harvest physiology. Vol. 1, first ed., Publication of Agricultural Education, Karaj, 530 pp.

11. McDonald, K., Sun, D.W., and Kenny,T. 2000. Comparison of the quality of cooked beef products cooled by vacuum cooling and by conventional cooling. Lebensmittel-Wissenschft and Technologie, 33:21-29.

12. Liyun, Z. and Sun, D.W. 2005. Vacuum Cooling of Foods. Food Refrigeration and Computerised Food Technology Group. National University of Ireland, Dublin, Ireland.

13. Longmore, A.p. 1973.The pros and cons of vacuum cooling. Food Industries of South Africa. 6-11.

14. Sun, D.W. 1999. Extension of the vase life of cut daffodil flowers by rapid vacuum cooling. International Journal of Refrigeration, 22: 472-478.

15. Thompson, A.K. 2003. Fruit and Vegetables: Harvesting, Handling and Storage. Black Well Publishing Ltd, New York. 320 pp.

16. Ozturk, H.M and Ozturk, H.K. 2009. Effect of pressure on the vacuum cooling of iceberg lettuce. International Journal of Refrigeration, 32:402-410.

17. Zhang, Z. and Sun, D.W. 2006. Effect of cooling methods on the cooling efficiencies and qualities of cooked broccoli and carrot slices. Journal of Food Engineering, 77:320-326.