

## فناوری افت فشار کنترل شده سریع و کاربردهای آن

نگار رنجبر<sup>۱</sup>، محمدحسن ایکانی<sup>۲\*</sup>، مجید جوانمرد داخلی<sup>۲</sup>، فرشته گل محمد<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، علوم و صنایع غذایی، پژوهشکده کشاورزی، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران
۲. دانشیار، علوم و صنایع غذایی، پژوهشکده فناوری‌های شیمیایی، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران
۳. استادیار، شیمی آلی، پژوهشکده فناوری‌های شیمیایی، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران

(تاریخ دریافت: 92/11/8، تاریخ پذیرش: 93/3/24)

### چکیده

افت فشار کنترل شده سریع، یک فرایند مکانیکی گرمایی می‌باشد که در آن، مواد خام به مدت کوتاهی در معرض بخار آب اشباع با فشار بالا قرار می‌گیرند و در ادامه یک افت فشار ناگهانی به سمت خلأ اعمال می‌گردد. طی این عمل، تبخیر خودبه‌خودی ترکیبات فرار رخ می‌دهد که باعث تورم بافت نمونه نیز می‌گردد و تخلخل افزایش می‌یابد. این فرایند مزایایی در رابطه با خشک کردن و استخراج ترکیبات مختلف از گیاهان به همراه دارد. از این فرایند تاکنون برای فعالیتهایی از جمله خشک کردن توت فرنگی، سیب‌زمینی و ماهی، آلودگی‌زدایی پودر شیر، بافت‌دهی دانه‌های قهوه و انواع میوه‌ها، استخراج مولکول‌های غیرفرار مثل فلاوونوئیدها و ترکیبات فرار از برخی گیاهان از جمله رزماری، برگ‌های مورد الجزایری و پوست پرتقال استفاده شده است. در این مقاله به بررسی کاربردهای مختلف این فناوری در صنعت غذا پرداخته شده است.

واژه‌های کلیدی: افت فشار کنترل شده سریع، بافت‌دهی، فرایند مکانیکی-گرمایی، استخراج.

**1- مقدمه**

در شکل 1 شماتیکی از راکتور DIC ملاحظه می‌شود. هدف از این مطالعه بررسی کاربردهای فناوری افت فشار کنترل شده سریع در مقیاس‌های آزمایشگاهی و صنعتی می‌باشد.

**1-2- مراحل یک چرخه DIC**

در شکل 2 یک چرخه‌ی DIC ملاحظه می‌شود که شامل مراحل زیر است:

- قرار دادن نمونه درون محفظه فرایند در فشار اتمسفر،
- اعمال خلأ مقدماتی،
- تزیق بخار اشباع با فشار معین،
- حفظ فشار بالا-دمای بالا به مدت مشخص،
- اعمال افت فشار سریع و
- رساندن فشار به فشار اتمسفر و برداشت مواد جامد [3].

**2- کاربردهای DIC و مزایای آن****1-2- سترون سازی**

افت فشار می‌تواند میکروارگانیسم‌ها را حتی در فرم اسپور نیز از طریق دو سازوکار حذف نماید:

- 1- تنش مکانیکی ناشی از افت فشار سریع که منجر به شکست بافت سلولی میکروارگانیسم می‌گردد و
- 2- تیمار حرارتی کنترل شده.

هرچه مقدار بخار تولیدی درون سلول بیشتر باشد و افت فشار در مدت زمان کم‌تری صورت پذیرد، اثر مکانیکی تشدید می‌گردد. در شکل 3 نمونه‌ای از اسپور تیمار شده با این روش مشاهده می‌شود [4]. در پژوهشی که توسط الاف و همکاران بر روی آلودگی‌زدایی نمونه‌های جلبک دریایی و پودر شیر بدون چربی صورت پذیرفت، نتایج نشان داد که این تیمار به‌خصوص، برای آلودگی‌زدایی ترکیبات حساس به حرارت، بسیار مناسب بوده و درصد آلودگی‌زدایی بالای 87٪ بود. در حالی که برای روش خشک کردن با تصعید میزان آلودگی‌زدایی حدود 19٪ بود. زمان و فشار بخار اشباع تاثیر مستقیمی روی میزان آلودگی‌زدایی داشت ولی تاثیر زمان بیش‌تر بود [4].

**2-2- خشک کردن و بافت‌دهی**

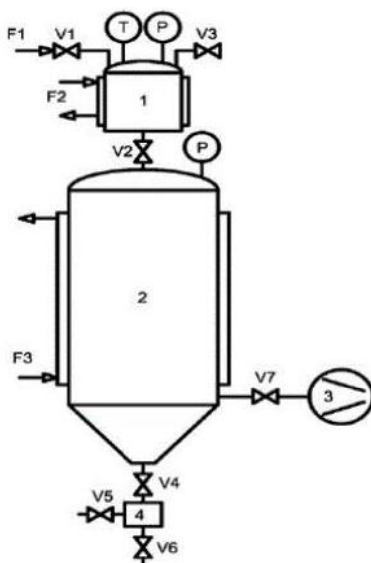
در هر فرایند خشک‌کردن، انتقال جرم و گرما به‌طور هم‌زمان وجود دارد. حذف آب به‌طور معمول، با چروکیدگی شدن

افت فشار کنترل شده سریع<sup>1</sup> یک روش به نسبت جدید و در حال توسعه است که موارد استفاده صنعتی متعددی را می‌تواند پوشش دهد. این فناوری به اختصار DIC نامیده می‌شود که مخفف کلمه فرانسوی *Détente Instantanée Contrôlée* می‌باشد. فناوری DIC بر اساس پدیده تبخیر خودبه‌خودی<sup>2</sup> ترکیبات فرار می‌باشد. در این فرایند، مواد خام به مدت کوتاهی در معرض بخار اشباع با فشار بالا تقریباً بین 1 تا 9 بار قرار می‌گیرند که بر حسب نوع محصول متفاوت می‌باشد. در این فشار دما به‌طور معمول، بین 100 تا 175 درجه سانتی‌گراد خواهد بود. سپس بخار آب و اسانس به فشاری مشابه فشار کلی محیط اطراف می‌رسند. بعد از این مرحله فشار بالا، در زمان کوتاه یک افت فشار بسیار سریع به سمت خلأ حدود 0/05 بار با سرعتی بیش‌تر از 5 بار بر ثانیه اعمال می‌گردد. این اتفاق نه تنها موجب تبخیر خودبه‌خودی شده، بلکه باعث سرد شدن سریع مواد باقی‌مانده جامد نیز می‌گردد و تجزیه گرمایی محصول سریع متوقف می‌شود، بافت محصول متورم شده و دیواره‌های سلولی می‌شکنند. در این ساختار متخلخل جدید به علت قابلیت نفوذ بالا، انتقال جرم افزایش می‌یابد. مرحله خلأ مقدماتی باعث می‌شود که بین سطح خارجی محصول و بخار، تماس نزدیکی ایجاد گردد، در نتیجه سطح تبادل افزایش و فرایند حرارت‌دهی شدت می‌یابد. در مرحله حرارت‌دهی هیچ انبساط بافتی<sup>3</sup> دیده نمی‌شود و محصول سریع به دمای بخار می‌رسد. در حین افت فشار، تبخیر آدیاباتیک آب فوق داغ و ترکیبات فرار رخ داده و تنش مکانیکی درون ماده ایجاد می‌شود. شکستن سلول‌ها وابسته به این تنش و رفتار ویسکوالاستیک ساختار ماده است که تابع محتوای رطوبت، دما و مدت زمان حرارت‌دهی می‌باشد. بعد از مرحله افت فشار و در حین مرحله خلأ، فشار کلی در محیط متخلخل در واقع مربوط به بخار آب و اسانس می‌باشد. انتقال داخلی گاز در یک محیط همگن و ایزوتروپیک صورت می‌پذیرد، نیروی محرکه اصلی برای این انتقال از مرکز به سطح و سپس به محیط اطراف، شیب فشار کل می‌باشد [1].

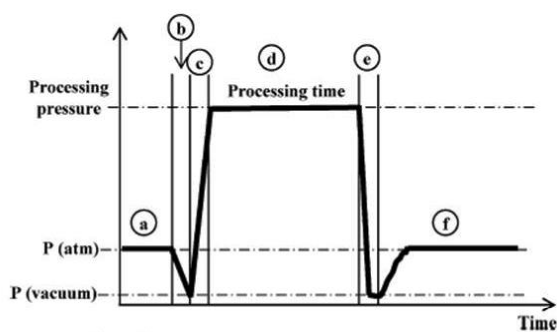
1. Instant controlled pressure drop, DIC

2. Autovaporization

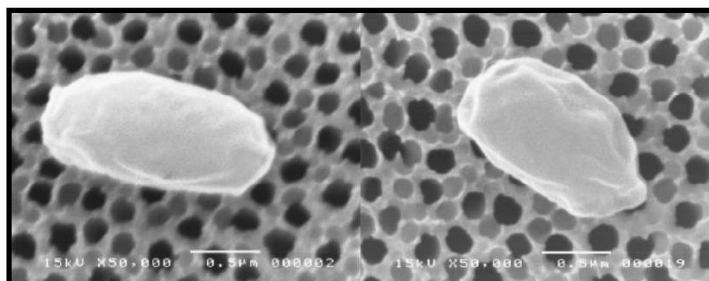
3. Expansion



شکل (1) شماتیک راکتور DIC: 1- اتوکلاو؛ 2- تانک خلأ؛ 3- پمپ خلأ؛ 4- محفظه عصاره؛ F1 و F2 جریان بخار؛ F3 جریان آب سرد [2]



شکل (2) مراحل یک چرخه DIC



شکل (3) اسپورهای باسیلوس استناروترموفیلوس، سمت راست: تیمار شده در دمای 130 درجه به مدت 30 ثانیه، سمت چپ: تیمار نشده

با این روش را از لحاظ نرخ انبساط، رنگ و درجه پخت بررسی کردند. پارامترهای اولیه که در تعیین کیفیت محصول نهایی مهم هستند عبارت بودند از فشار بخار اشباع، زمان تیمار، محتوای رطوبت و ضخامت قطعات. نتایج نشان داد که فشار بیش‌ترین تاثیر را بر روی حجم نهایی محصول داشت و نسبت به محصولاتی که با هوای داغ خشک شده بودند، حجم نهایی 2/2 تا 4/5 برابر بیش‌تر بود. در حضور آب، از محصول در برابر تغییر دما محافظت می‌شود. در محتوای آب کم‌تر از 5٪ تیمار در دمای بالا به مدت مشخص منجر به تغییر شکل زیادی می‌شود که می‌تواند به شدت باعث بی‌رنگی محصول گردد. بنابراین محتوای رطوبت حدود 15٪ برای جلوگیری از تغییرات جدی رنگ ضروری دیده شد [5]. در پژوهش دیگری که در سال 2008 توسط ایگوایجیتال و همکاران انجام شد، نمودار جذب رطوبت قطعات سیب‌زمینی خشک شده با هوای داغ و بافت‌دهی شده با DIC تعیین و با روش وزن‌سنجی<sup>1</sup> با هم مقایسه شدند. برای رسم نمودارهای جذب، نمونه‌ها در محفظه‌هایی با دماهای کنترل شده 20، 30 و 40 درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی کنترل شده بین 5 تا 90٪ نگهداری شدند. هر دو ایزوترم جذب و دفع شکل سیگموئیدی (نوع II) داشتند. سیب‌زمینی‌های تیمار شده در فشار 6 بار نسبت به فشار 3 بار و نمونه‌های خشک شده با روش هوای داغ، اختلاف هیسترسیس کم‌تری داشتند که به علت ایجاد سطحی بدون نیروهای موئینگی در محصول بافت‌دهی شده بود. محتوای رطوبت تک لایه برای سیب‌زمینی‌های بافت‌دهی شده بیش‌تر بود. فعالیت آبی با شدت بخشیدن به تیمار DIC در محتوای رطوبت ثابت کاهش پیدا می‌کرد که در نتیجه قابلیت انبارمانی را افزایش می‌داد. انرژی مرتبط با فرایند جذب<sup>2</sup> که بزرگ‌تر از گرمای تبخیر است، با کاهش محتوای رطوبت افزایش می‌یافت و این افزایش برای سیب‌زمینی‌های بافت‌دهی شده بیش‌تر بود که علت آن ایجاد شدن یک شبکه قطبی بسیار پر انرژی بعد از بافت‌دهی بود. بافت‌دهی با DIC سطح قطعات سیب‌زمینی را تقریباً تا 45٪ افزایش داد [6].

در کار دیگری از الحداد از روش ترکیبی خشک کردن با هوای داغ-DIC-میکروویو برای قطعات سیب سبز و سیب‌زمینی

محصول همراه است که به شدت شکل ماده را تغییر می‌دهد. این چروکیدگی باعث افزایش هدایت گرمایی نیز می‌گردد که در نتیجه انتقال گرما بیش‌تر شده و نفوذ و ظرفیت انتشار آب و بخار درون ماده کاهش می‌یابد. در این مرحله انتقال جرم یک عامل محدودکننده خواهد بود که نه تنها باعث می‌گردد فرایند خشک کردن آهسته صورت گیرد، بلکه شدت آسیب‌های گرمایی نیز افزایش خواهد یافت [5].

بنابراین در حین فرایند خشک کردن توالی از دو فاز وجود دارد؛ در مرحله اول، انتقال جرم بسیار فعال و شدید وجود دارد که باعث تغییر شکل ماده می‌شود و در مرحله دوم، انتقال جرم محدود می‌باشد و تخریب‌های گرمایی متنوعی وجود خواهد داشت. به نظر می‌رسد که برای جلوگیری از این تخریب‌ها بین این دو مرحله، یک مرحله بافت‌دهی لازم می‌باشد. این مرحله یک ساختار متخلخل به ماده می‌دهد که باعث افزایش انتقال جرم در فاز دوم فرایند خشک کردن می‌شود. تیمار افت فشار از طریق تنش مکانیکی ناشی از تبخیر می‌تواند منجر به انبساط بافت گردد. در رابطه با خشک کردن، مرحله نهایی آن به‌طور معمول، با روش معمولی خشک کردن با هوای داغ خواهد بود. اختلاف فشار عامل بسیار مهمی در فرایند بافت‌دهی و همچنین یک نیروی محرکه در تغییر اندازه منافذ می‌باشد [5].

از افت فشار می‌توان هم به عنوان تیماری پیش از خشک کردن دقیقاً بعد از برداشت و یا به عنوان بخشی از تیمار بخاردهی برنج استفاده کرد. در هر دو مورد، برنجی که تحت تیمار افت فشار قرار گرفته نسبت به برنج‌هایی که با روش‌های قدیمی خشک می‌شوند مزایایی خواهد داشت که در زیر آورده شده است:

- تیمار حرارتی کوتاه (30 ثانیه به جای 40 تا 60 دقیقه در روش‌های معمولی خشک کردن)،
- مدت زمان خشک کردن 2 ساعت به جای 8 ساعت بدون نیاز به مرحله معتدل کردن<sup>1</sup>،
- کیفیت بهتر محصول نهایی و
- عملکرد بهتر (درصد برنج‌های شکسته حدود 3٪ به جای 15-35 درصد برای روش‌های معمولی) [4].

مواد غذایی مختلفی با DIC بافت‌دهی و خشک شده‌اند، لوکا و همکاران در تحقیقی کیفیت سبزیجات به‌دست آمده

1. Gravimetric  
2. Net isosteric heat of sorption

1. Tempering

8-2 گرم آب برسد و ظرفیت نگهداری روغن از 0/4 گرم روغن به ازای یک گرم ماده خشک به 2- 0/8 گرم روغن برسد. نتایج آزمون میکروبی نیز نشان داد که هیچ رشد قارچی در محصول نهایی دیده نشده در حالی که در خشک کردن با نور آفتاب رشد قارچی مشاهده می‌شد که علت آن سرعت کم خشک شدن بود. در رابطه با کاهش محتوای باکتری‌ها، در فرایندی که از DIC استفاده نشده بود این کاهش 60/7% بود در حالی که با استفاده از DIC حدود 85/7% گزارش شد [9].

در سال 2011 برای خشک کردن موز از این روش استفاده شد. در این تحقیق پارامترهای DIC عبارت بودند از فشار بخار اشباع و زمان فرایند. نتایج به دست آمده نشان داد که ضریب انتشار آب برای نمونه‌های تیمار شده بیش‌تر از نمونه‌های تیمار نشده بود. هم‌چنین ظرفیت نگهداری آب نیز افزایش یافت که علت آن مربوط به تغییر ساختار ماده و تشکیل سوراخ‌های کوچک و افزایش سطح نمونه بود. ظرفیت نگهداری روغن کاهش یافت که مربوط به کاهش محتوای چربی، پروتئین و قند بعد از قرار گرفتن محصول در دمای بالا حین DIC بود. مشاهده شد که بافت‌دهی موز، از تبدیل نشاسته موز به قندهای کاهش یافته جلوگیری کرد که به علت غیر فعال شدن آنزیم‌ها حین مرحله بافت‌دهی بود [10].

آلبیتار و همکاران در سال 2011 به جای استفاده از DIC به عنوان یک فرایند بافت‌دهی، از آن به عنوان یک پیش تیمار با هدف آنزیم‌بری-بخاردهی برای برش‌های تازه پیاز استفاده کردند. فشار بخار استفاده شده بین 2 تا 5 بار به مدت 5 تا 15 ثانیه بود. سپس خشک کردن در دمای 40 درجه سانتی‌گراد با سرعت جریان هوای 1 m/s با هوای داغ صورت پذیرفت. نتایج نشان داد که DIC توانست شدت انتقال جرم را افزایش دهد و زمان خشک شدن را از 3200 دقیقه برای نمونه‌های تیمار نشده به 700 دقیقه برای نمونه‌های تیمار شده برساند، هم‌چنین ضریب انتشار آب نیز از  $1/02 \times 10^{-10}$  به  $2/09 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s افزایش یافت و فشار به عنوان موثرترین پارامتر شناسایی شد. کیفیت کلی محصول نیز بهبود یافت [11].

مونیر و همکاران، از DIC بین دو مرحله خشک کردن

شیرین استفاده شد. در این روش مرحله اول خشک کردن با هوای داغ 45 درجه سانتی‌گراد به مدت 2 ساعت، سپس بافت‌دهی با DIC و مرحله دوم خشک کردن استفاده از میکروویو با توان 720 وات بود و توانستند در مرحله دوم خشک کردن، رطوبت نهایی محصول را به 5% در مدت زمانی کم‌تر از 5 دقیقه برسانند، در حالی که برای خشک کردن با هوای داغ روی نمونه‌های خام و تیمار شده این مدت زمان به ترتیب 8 ساعت و 2 ساعت بود [7]. در پژوهش دیگری، گرانول‌های چوب پنبه تا رسیدن به رطوبت 17% بر مبنای خشک، خشک گردیدند. سپس تیمار DIC با فشار 0/03 بار به مدت 3 دقیقه اعمال گردید و در نهایت نمونه‌ها در خشک‌کن با دمای محیط تا رسیدن به رطوبت 6% خشک شدند. ایزوترم جذب رطوبت گرانول‌های تیمار شده با DIC و تیمار نشده در دماهای 25، 40 و 60 درجه سانتی‌گراد و فعالیت‌های آبی مختلف بین 0/05-0/9 رسم شدند. قطر گرانول‌ها نیز بین (1-0/5)، (2-4) و (4-6) میلی‌متر بودند. ایزوترم برای نمونه‌های تیمار شده و نشده سیگموئیدی نوع II بود. نتایج نشان داد که در فعالیت آبی ثابت، با افزایش دما، محتوای رطوبت تعادلی کاهش می‌یافت. تاثیر تیمار DIC به شکل چوب پنبه‌ها وابسته بود. هر چه گرانول‌ها بزرگ‌تر بودند، فعالیت آبی برای محتوای آب یکسان به دلیل بهبود ساختار، کم‌تر بود. محتوای آب تک لایه در گرانول‌های بزرگ‌تر بعد از تیمار DIC افزایش یافت [8]. در سال 2009، سیتیوپراتاما و همکاران از این روش برای خشک کردن آرد کاساوا استفاده کردند؛ مرحله اول خشک کردن با هوای داغ در دمای 50 درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به رطوبت 20-25% بر مبنای مرطوب صورت پذیرفت. سپس نمونه‌ها تحت تیمار افت فشار قرار گرفته و در ادامه مرحله نهایی خشک کردن با هوای داغ 50 درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به رطوبت 7% انجام شد. نتایج نشان داد که ضریب انتشار آب برای نمونه‌ی شاهد از  $1/13 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s به  $(1/37-3/26) \times 10^{-10}$  برای نمونه‌های تیمار شده با DIC رسید. هم‌چنین با افزایش زمان تیمار در فشارهای بیش‌تر از 4 بار ظرفیت نگهداری روغن افزایش یافت. با افزایش زمان تیمار تا بیش‌تر از 30 ثانیه ظرفیت نگهداری آب نیز افزایش پیدا کرد. بافت‌دهی باعث شد ظرفیت نگهداری آب از 1/2 گرم آب به ازای 1 گرم ماده خشک آرد کاساوا به

در ادامه خشک کردن با هوای داغ و صیقلی کردن برنج اعمال شد. DIC در فشارهای 6-4 بار با زمانی کم‌تر از 30 ثانیه اعمال گردید که مزایای زیادی در رابطه با زمان خشک کردن داشت و زمان را از حدود یک روز خشک کردن با هوای داغ 50 درجه سانتی‌گراد به 3 ساعت رساند. در مرحله صیقلی کردن برنج نیز بازده برنج کامل (قهوه‌ای) از 60-52 به 70-68 درصد رسید. در رابطه با ارزیابی طعم نیز از پنل‌های بین‌المللی استفاده شد و کیفیت برنج، عالی ارزیابی شد [15].

### 2-3- خشک کردن با شیب فشار کلی<sup>1</sup>

این نوع دیگری از خشک کردن با DIC می‌باشد. در این روش تبخیر خودبه‌خودی به عنوان یک مرحله حذف مقدار مشخصی از آب به کار می‌رود، بنابراین یک توالی از سیکل‌های فشار و افت فشار بعدی آن می‌تواند به میزان زیادی خشک کردن را شدت بخشد. در DDS به جای بخار آب اشباع از هوای خشک استفاده می‌شود و نمونه مدت بیشتری در خلأ باقی می‌ماند. در شکل 4 توالی از چرخه‌های افت فشارهای متوالی<sup>2</sup> مشاهده می‌شود [4].

از روش خشک کردن با DDS برای خشک کردن ماهی استفاده شده و نسبت به روش‌های خشک کردن تصعیدی، خشک کردن تحت خلأ و خشک کردن با هوای داغ سریع‌ترین روش بود و کیفیت محصول نهایی بسیار عالی و نمونه‌ها بدون چروکیدگی بودند. در رابطه با رنگ نمونه‌های خشک شده، بهترین رنگ با روش‌های DDS و DIC به دست آمدند [17]. از این روش برای خشک کردن گونه‌های مختلف برنج‌هایی که تحت تیمار DIC قرار گرفته بودند نیز استفاده شده است. خشک کردن با این روش حدود 2 ساعت به طول انجامید و رطوبت محصول نهایی از 25-20 به 13-12 درصد رسید و کیفیت آسیاب کردن بهبود یافت. برنج نهایی سفید بود و به راحتی از برنج‌های پیش پخت شده قابل تشخیص بود. برنج‌های DDS کم‌تر از 3٪ دانه‌های شکسته و کیفیت ارگانولپتیکی بالایی با حفظ عطر طبیعی و بافتی غیرچسبناک داشتند و زمان پخت برنج کامل و برنج سفید نیز به ترتیب 15 و 7 دقیقه، کاهش

اسنک و پودر پنیر استفاده کردند. اسنک‌های به‌دست آمده به رطوبتی کم‌تر از 3٪ بر مبنای خشک رسیدند و تردی بالایی داشتند. دانسیته مخصوص نیز به پارامترهای فرایند DIC مرتبط بود. هر چه فشار بخار بیش‌تر بود نرخ توسعه و میزان تخلخل افزایش یافت و در نتیجه دانسیته مخصوص کاهش پیدا کرد [12]. ماریتزا و همکاران در مطالعه‌ای روی خشک کردن توت‌فرنگی با این روش اثبات کردند که اصلاح ساختار منجر به کاهش مدت زمان خشک کردن گردید و محصولات نسبت به نمونه‌های معمولی کیفیت بالایی داشتند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که تیمار DIC تاثیر زیادی روی سرعت خشک کردن داشت به طوری که سرعت خشک شدن توت‌فرنگی‌های تیمار شده با DIC حتی در دماهای پایین نیز تسریع یافت که علت آن مربوط به تاثیر مستقیم متورم شدن روی ضریب انتشار بود. علاوه بر این تاثیر مکانیکی افت فشار منجر به انبساط بافت می‌شود در حالی که زمان کوتاه فرایند حرارتی می‌تواند کیفیت را حفظ کند. این بافت اصلاح شده امکان دسترسی به آب محصور شده و انتشار آن را در مرحله دوم خشک کردن افزایش داد. زمان لازم برای رسیدن به محتوای رطوبت نهایی بهینه در حالتی که از تیمار DIC استفاده گردید، بسیار کوتاه‌تر از روش‌های متداول خشک کردن با هوای داغ بود، طوری که طی زمان 1 ساعت رطوبت به 3٪ رسید. هم‌چنین ظرفیت نگهداری آب نیز در محصولات افزایش یافت [13]. در پژوهش دیگری روی سرعت آبیگری مجدد فلفل سبز مراکشی، نتایج نشان داد که این تیمار به میزان زیادی دسترسی اولیه و ضریب انتشار آب را حین خشک کردن با هوای داغ افزایش داد. هم‌چنین این امکان را فراهم آورد که مدت زمان لازم برای رسیدن به رطوبت 5٪ بر مبنای خشک حدود 1/7 برابر کاهش یابد. در رابطه با آبیگری مجدد، مدت زمان لازم برای رسیدن به رطوبت 300٪ بر مبنای خشک در رابطه با نمونه‌های مختلف، در حالتی که از شرایط بهینه DIC استفاده شد 3/7 برابر کاهش یافت. ظرفیت نگهداری آب محصولات خشک شده با DIC نسبت به دو روش خشک کردن با هوای داغ و خشک کردن تصعیدی بیش‌تر بود [14]. همان‌طور که اشاره شد یکی از کاربردهای دیگر DIC بخاردهی برنج می‌باشد. پیلاتوسکی و همکارانش در پژوهشی از DIC به عنوان یک فرایند پس از برداشت استفاده کردند و

1. Total Pressure Gradient (TPG)

2. Dehydration by Successive Pressure Drops(DDS)

یافت [16].

## 4-2- استخراج ترکیبات فرار

فناوری افت فشار از طریق تبخیر خودبه‌خودی منجر به جابه‌جایی قسمت اعظمی از مولکول‌های فرار موجود در گیاه می‌گردد. اگر از DIC چند سیکلی استفاده شود، استخراج کامل در چند دقیقه حاصل می‌گردد که از جمله مزایای دیگر آن، صرفه جویی در انرژی و استفاده‌ی کم‌تر از آب است. در رابطه با این کاربرد، DIC نسبت به روش‌های دیگر مزایایی دارد. در روش تقطیر بخار و تقطیر آبی دما بالا منجر به تغییرات شیمیایی شده و اغلب، بیش‌تر ترکیبات فرار از دست می‌روند. در روش استخراج با حلال نیز غیر ممکن است که بتوان محصولی عاری از حلال به‌دست آورد و هم‌چنین میزان ترکیبات فرار از دست رفته در این روش خیلی بالاست. استخراج با حلال فوق داغ، محصولاتی عاری از حلال و با کیفیت بالا می‌دهد ولی ایجاد شرایط فنی عملیاتی مورد نیاز برای استفاده از حلال‌های فوق داغ مشکل می‌باشد و هزینه عملیاتی آن بالاست در نتیجه استفاده از آن محدود است. علاوه بر این، پژوهش‌های بسیاری نشان داده‌اند که دی‌اکسید کربن علاوه بر اسانس‌ها ترکیباتی از جمله واکس‌ها و رزین‌ها را نیز استخراج می‌کند. استخراج با مایکروویو مزایایی در رابطه با سرعت فرایند و محافظت از ترکیبات شیمیایی دارد اما استفاده از این روش هنوز در مقیاس صنعتی صورت نگرفته است [18].

ریزاگ و همکارانش در سال 1988 از این فناوری برای استخراج اسانس از برگ‌های رزماری استفاده کردند، برگ‌های رزماری به مدت کوتاهی تحت فشار بخار اشباع با فشار 0/5 تا 3 بار قرار گرفتند. رطوبت اولیه ثابت و حدود 35٪ در نظر گرفته شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که فشار 1 بار و زمان 10 دقیقه با 2 بار افت فشار برای استخراج بیش از 90٪ اسانس مناسب است. هم‌چنین با افزایش فشار، بازده استخراج افزایش یافت چنان که بیش از 97٪ ترکیبات اسانسی پس از 10 دقیقه در فشار 3 بار استخراج شدند. مقدار اسانس باقی‌مانده در فشار یک بار حدود 9٪ و برای فشار 3 بار کم‌تر از 3٪ بود. در این مطالعه، فشار نسبت به زمان پارامتر تاثیرگذارتری شناسایی شد [19]. در رابطه با استخراج

ترکیبات فرار در کاری که کریستیوان انجام داد توانست اسانس کاناگای اندونزیایی را در مدت زمانی کم‌تر از 6 دقیقه با بازده 2/8 گرم از 100 گرم ماده خشک به‌دست آورد در حالی‌که با روش تقطیر با بخار آب همین بازده یعنی 2/5 گرم بر 100 گرم ماده خشک را در مدت 16 ساعت به‌دست آوردند [20]. از این تیمار برای استخراج اسانس لاواندین<sup>1</sup> نیز استفاده شده است؛ در این پژوهش، دو روش استخراج افت فشار کنترل شده سریع و تقطیر با بخار آب با هم مقایسه شدند. مهم‌ترین تفاوت این دو روش، اختلاف در بازده استخراج بود که برای روش افت فشار 4/25 و برای تقطیر (ماده خام 100g) 2/3 بود. مدت زمان استخراج نیز در روش تقطیر حدود چندین ساعت بود در حالی که برای افت فشار کل زمان حرارت دادن نمونه 480 ثانیه بود بنابراین مصرف انرژی تا حدود 662 kWh برای هر تن مواد خام کاهش یافت [2]. استخراج اسانس از برگ‌های مورد الجزایری نیز با این روش انجام شده است و نتایجی مشابه حاکی از موفق بودن این تیمار به اثبات رسیده است [21]. در شکل 5 عکس برگ‌های مورد الجزایری که تحت تیمار DIC قرار گرفته‌اند مشاهده می‌شود، در برگ‌های تیمار شده اندازه منافذ بزرگ‌تر می‌باشد.

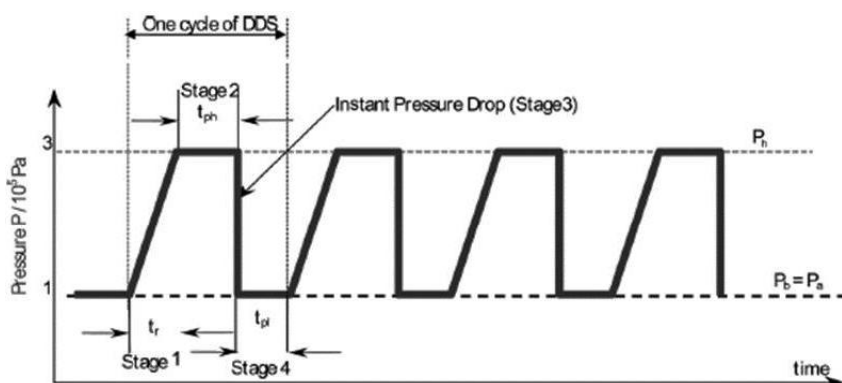
در سال 2013، الف و همکاران از این تیمار به عنوان یک مرحله بوگیری برای برگ‌های رزماری استفاده کردند که توانستند این عمل را طی مدت زمان 3 دقیقه انجام دهند در حالی‌که با روش تقطیر آبی استخراج حدود 4 ساعت به طول انجامید. هم‌چنین میزان ترکیبات استخراج شده نسبت به روش تقطیر با بخار آب بیش‌تر بود (24 ترکیب برای DIC نسبت به 20 ترکیب برای تقطیر آبی) [22].

## 5-2- استخراج ترکیبات غیر فرار

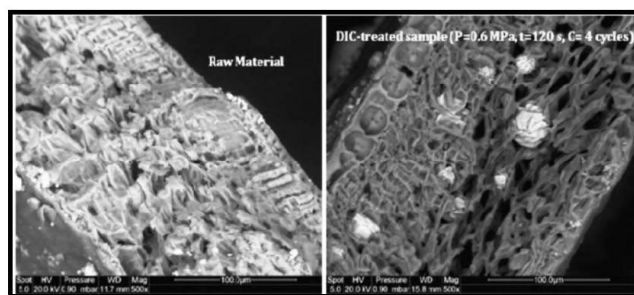
در رابطه با استخراج با حلال 4 سازوکار انتقال جرم شناخته شده هستند:

- 1-انتقال حلال درون محصول از طریق فرایندهایی مثل انتقال موئینگی، انتشار مولکولی و اختلاف غلظت محتوای حلال،
- 2-انتقال حل‌شونده به درون حلال نفوذ کرده به محصول از طریق انتشار مولکولی به علت اختلاف غلظت ماده حل‌شونده در حلال،

1. lavandin



شکل (4) توالی چرخه‌های DDS [16]



شکل (5) ساختار میکروسکوپ الکترونی برگ‌های گیاه مورد الجزایری تیمار شده و نشده [21]

را قبل از استخراج با دی اکسید کربن فوق بحرانی اعمال کردند که نشان داده شد ضریب انتقال جرم نسبت به نمونه‌های شاهد تا 4 برابر افزایش یافته و استخراج روغن از دانه‌های سویا با سهولت بیشتری انجام شد [24]. استخراج آنتوسیانین از Roselle مالزیایی تیمار شده با DIC در سال 2009 توسط امور و الاف بررسی شد. در این پژوهش به بررسی اثر DIC به عنوان یک پیش تیمار بر استخراج آنتوسیانین پرداخته شد. متغیرها فشار و زمان بودند. با تعیین پارامترهای مختلف موثر، مشاهده شد که DIC، هم روند حرکت حلال و هم بازده استخراج را بهبود داد. فشار 11 بار و زمان حرارت‌دهی 18 ثانیه، 1/35٪ بازده استخراج آنتوسیانین را بهبود بخشید. با مطالعه روند استخراج مشخص شد که ضریب انتشار از  $10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  تا  $4/62 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  برای مواد خام به  $4/19 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  برای مواد تیمار شده رسیده است [25]. نوین وان

3-تعامل حلال بین سطح تبادل مواد و حلال در تماس با آن و 4-انتقال حل‌شونده به حلال خارج از سطح محصول. در این مرحله اگر هم‌زدن وجود نداشته باشد، انتقال از طریق انتشار خواهد بود در غیر این صورت از طریق همرفت می‌باشد. روش DIC از طریق بسط دادن ساختار ماده، کل فرایند بالا به‌خصوص، انتشار حلال به درون ماتریس را شدت می‌بخشد. به علاوه این تیمار میزان تخلخل را افزایش داده و سطح مخصوص افزایش می‌یابد. بنابراین حلال راحت‌تر وارد ماتریس گیاه شده و میزان استخراج افزایش می‌یابد. بافت‌دهی با DIC به عنوان یک پیش تیمار قبل از استخراج انجام می‌شود که منجر به کاهش زمان استخراج نیز می‌گردد [23].

در رابطه با استفاده از DIC به عنوان پیش تیمار برای بهبود استخراج نیز مطالعات مختلفی انجام شده است. این پیش تیمار



## 2-6- کاربردهای دیگر

از روش افت فشار کنترل شده سریع برای بهبود ارزش تغذیه‌ای نیز استفاده شده است. در مطالعه‌ای که با هدف کاهش محتوای فیتات در سال 2007 توسط حداد و همکاران روی دانه‌های لوبین آلبوس و لوبین موتابیلیس انجام شد تا ارزش تغذیه‌ای افزایش یابد و اثرات مضر فیتات حذف گردد. نتایج نشان داد که تیمار DIC به مدت 1 دقیقه توانست محتوای فیتات را 16٪ برای لوبین آلبوس و 19٪ برای لوبین موتابیلیس و تیمار 7 دقیقه‌ای به ترتیب 55 و درصد کاهش دهد. متغیرهای DIC در این پژوهش عبارت بودند از فشار بخار اشباع، 4-7 بار، زمان حرارت‌دهی 40-60 ثانیه و محتوای رطوبت 30-50 درصد بر مبنای خشک، که در این بین تاثیرگذارترین عامل فشار بخار اشباع بود [28].

## 3- نتیجه گیری

هدف از این مطالعه، نشان دادن قابلیت استفاده از فناوری افت فشار کنترل شده سریع در زمینه‌های مختلف صنعت غذا بود. کاربردهای DIC بسیار متنوع بوده و می‌توان از آن در شاخه‌های مختلف این صنعت استفاده کرد. نکته دیگری که در رابطه با این روش وجود دارد قابلیت استفاده از آن در مقیاس‌های صنعتی است. این روش علاوه بر سازگار بودن با محیط زیست، هزینه‌ها را در مقایسه با برخی روش‌های دیگر مثل استخراج با دی اکسید کربن فوق بحرانی بسیار کاهش می‌دهد. نتایج پژوهش‌های صورت گرفته، کارکرد قابل قبول این روش را به‌خصوص در رابطه با خشک کردن مواد غذایی و استخراج اسانس به اثبات رسانده است.

نیز از این پیش تیمار برای استخراج روغن از دانه‌های جاتروفا و کلزا استفاده کرد که توانست بازده را به ترتیب 112 و 153 درصد افزایش و زمان استخراج را 30 و 60 دقیقه کاهش دهد. در حالی که در هر دو مورد، زمان معمول 120 دقیقه می‌باشد. این تیمار بافت‌دهی، میزان دسترسی را افزایش داد به طوری که 90٪ روغن جاتروفا در مرحله اول روغن‌گیری استخراج شد در حالی که برای جاتروفای تیمار نشده فقط 75٪ روغن به دست آمد. انتشار حلال درون ماتریس جامد جاتروفای تیمار شده با DIC دو برابر بیشتر بود. برای کلزا هم نتایج مشابهی به دست آمد، به طوری که استخراج روغن در مرحله اول روغن‌گیری از 26/7 به 80 درصد رسید و انتشار حلال 11 برابر بیشتر بود. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که موثرترین پارامتر فرایند روی بازده و زمان استخراج، فشار بخار اشباع بوده است [26]. در پژوهشی بر روی استخراج هسپردین از پوست پرتقال با روش اولتراسوند، پیش تیمار DIC اعمال گردید و زمان استخراج برای 95٪ ترکیبات از 193 دقیقه برای نمونه‌های تیمار نشده به 49 دقیقه برای نمونه‌های تیمار شده کاهش یافت [1]. در کار دیگری از کمال و الاف که در سال 2013 روی دانه‌های قهوه انجام شد نتایج نشان داد که تیمار DIC مزایای واضحی در رابطه با بازده بالا و بهبود بازیافت پلی فنل‌ها از دانه‌های سبز قهوه داشت. استخراج ترکیبات فنولیک کل از دانه‌های تیمار شده در فشار 6 بار، محتوای رطوبت 23٪ و زمان 50 ثانیه بیش از 15/82٪ بود در حالی که برای دانه‌های تیمار نشده 7/8٪ مشاهده شد [27].

## منابع

essential oils: Fundamentals and experimental studies. *J. Chromatography A.*, 1217, 6807-6815.

[3] Maache-Rezzoug, Z., Allaf, K. (2005). Study of the effect of hydrothermal process on pasta quality. *J. Cereal Sci.*, 41, 267-275.

[4] Allaf, T., Besombes, C., Mix, I., Lefevre, L., Allaf, K. (2011). Decontamination of solid and powder food-stuffs using DIC technology, in: InTech (Ed), *Advances in Computer Science and Engineering*. Springer,

[1] Allaf, T., Mounir, S., Tomao, V., Chemat, F. (2012). Instant controlled pressure drop combined to ultra-sounds as innovative extraction process combination: fundamental aspects. *J. Procedia Eng.*, 42, 1061-1078.

[2] Besombes, C., Berka-Zougali, B., Allaf, K. (2010). Instant controlled pressure drop extraction of lavandin

- Characterization of pure cheese snacks and expanded granule powders textured by the instant controlled pressure drop (DIC) process. *J. Dairy Sci. Technol.*, 91, 441-455.
- [13] Maritza, A.M., Sabah, M., Anaberta, C.M., Montejano-Gaitán, J.G., Allaf, K. (2012). Comparative study of various drying processes at physical and chemical properties of strawberries (*Fragaria var. camarosa*). *J. Procedia Eng.*, 42, 267-282.
- [14] Téllez-Pérez, C., Sabah, M.M., Montejano-Gaitán, J.G., Sobolik V., Martinez, C.A., Allaf, K. (2012). Impact of instant controlled pressure drop treatment on dehydration and rehydration kinetics of green Moroccan pepper (*Capsicum annum*). *J. Procedia Eng.*, 42, 978-1003.
- [15] Pilatowski, I., Mounir, S., Haddad, J., Thai Cong, D., Allaf, K (2010). The instant controlled pressure drop process as a new post-harvesting treatment of paddy rice: impacts on drying kinetics and end product attributes. *J. Food Bioprocess Technol.*, 3, 901-907.
- [16] Thai Cong, D., Al Haddad, M., Rezzoug, Z., Lefevre, L., Allaf, K. (2008). Dehydration by successive Pressure drops for drying paddy rice treated by instant controlled pressure drop. *J. Dry. Technol.*, 26(4), 443-451.
- [17] Haddad, J., Juhel, F., Louka, N., Allaf, K. (2004). A study of dehydration of fish using successive pressure drops (DDS) and controlled instantaneous pressure drop (DIC). *J. Dry. Technol.*, 22(3), 457-478.
- [18] Rezzoug, S.A., Boutekedjiret, C., Allaf, K. (2005). Optimization of operating conditions of rosemary essential oil extraction by a fast controlled pressure drop process using response surface methodology. *J. Food Eng.*, 71, 9-17.
- [19] Rezzoug, S.A., Baghdadi, M.W., Louka, N., Boutekedjiret, C., Allaf, K. (1988). Study of a new extraction process: controlled instantaneous Matthias Schmidt, Croatia, pp 261-282.
- [5] Louka, N., Juhel, F., Allaf, K. (2004). Quality studies on various types of partially dried vegetables textured by Controlled Sudden Decompression General patterns for the variation of the expansion ratio. *J. Food Eng.*, 65, 245-253.
- [6] Iguedjtal, T., Louka, N., Allaf, K. (2008). Sorption isotherms of potato slices dried and textured by controlled sudden decompression. *J. Food Eng.*, 85, 180-190.
- [7] Al Haddad, M., Mounir, S., Sobolik, V., Allaf, K. (2007). Fruits and vegetables drying combining hot air, DIC technology and microwaves, in: Proceedings of the 5th Asia-Pacific Drying Conference. (pp. 1064-1069), Hong Kong.
- [8] Abdulla, G., Belghit, A., Allaf, K. (2009). Impact of instant controlled pressure drop treatment on moisture adsorption isotherm of cork granules, *J. Dry. Technol.*, 27(2), 237-247.
- [9] Setyoprato, P., Fatmawati, A., Allaf, K. (2009). Texturing by instant controlled pressure drop DIC in the production of cassava flour: Impact on dehydration kinetics, product physical. Properties and microbial decontamination. In: Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science (WCECS) .Vol I. (pp. 112-117). San Francisco, USA.
- [10] Setyoprato, P., Fatmawati, A., Sutrisna, P.D., Savitri, E., Allaf, K (2012). The dehydration kinetics, physical properties and nutritional content of banana textured by instantaneous controlled pressure drop. *Asia-Pacific J. Chem. Eng.*, 7(5), 726-732.
- [11] Albitar, N., Mounir, S., Besombes, C., Allaf, K. (2011). Improving the drying of onion using the instant controlled pressure drop technology. *J. Dry. Technol.*, 29(9), 993-1001.
- [12] Mounir, S., Halle, D., Allaf, K. (2011).

- controlled pressure drop dic-assisted-solvent extraction of total phenols of green coffee beans. *J. Food Stud.*, 2(1), 42-61.
- [28] Haddad, J., Greiner, R., Allaf, K. (2007). Effect of instantaneous controlled pressure drop on the phytate content of lupin. *J. LWT-Food Sci., Tech.* 40, 448-453.
- decompression. Application to the extraction of essential oil from rosemary leaves. *J. Flavor Frag.*, 13, 251-258.
- [20] Kristiawan, M., Sobolik, V., Al-Haddad, M., Allaf, K. (2008). Effect of pressure-drop rate on the isolation of cananga oil using instantaneous controlled pressure-drop process. *J. Chem. Eng. Process.*, 47, 66-75.
- [21] Berka-Zougali, B., Hassani, A., Besombes, C., Allaf, K. (2010). Extraction of essential oils from Algerian myrtle leaves using instant controlled pressure drop technology. *J. Chromatography A.*, 1217, 6134-6142.
- [22] Allaf, T., Tomao, V., Ruiz, K., Bachari, K., El-Maataoui, M., Chemat, F. (2013). Deodorization by instant controlled pressure drop autovaporization of rosemary leaves prior to solvent extraction of antioxidants. *J. LWT - Food Sci. Tech.*, 51, 111-119.
- [23] Allaf, T., Berka-Zougali, B., Nguyen, C.V., Negm, M., Allaf, K. (2014). DIC texturing for solvent extraction. Instant controlled pressure drop (D.I.C.) in: Allaf, K., Allaf, T. (Eds). *Food Processing From Fundamental to Industrial Applications*, Springer, New York, pp 127-157.
- [24] Rochova, K., Sovova, H., Sobolik, V., Allaf, K. (2008). Impact of seed structure modification on the rate of supercritical CO<sub>2</sub> extraction. *J. Super Crit. Fluid.*, 44, 211-218.
- [25] Amor, B., Allaf, K. (2009). Impact of texturing using instant pressure drop treatment prior to solvent extraction of anthocyanins from Malaysian Roselle (*Hibiscus sabdariffa*). *J. Food Chem.*, 115, 820-825.
- [26] Allaf, K., Besombes, C., Kristiawan, M., Sobolik, V., Allaf, T. (2010). Instant controlled pressure drop technology in plant extraction processes, in: Lebovka, N., Vorobier, E., Chemat, F(Eds), *Enhancing Extraction Processes in the Food Industry*, CRC press, Cambridge, pp 289-295.
- [27] Kamal, I., Allaf, K. (2013). Optimization of instant