Impact of Slow Freezing on Nutritional Value and Antioxidant Properties in Selected Vegetables and Fruits: A Comparative Study on Peas, Corn, and Figs.

Hanan Essa [*]
Dr. Ramez Mohammad [**]
Dr. Ali Ali [***]

(Received 21 / 2 / 2026. Accepted 21 / 4 /2026)

□ ABSTRACT □

The results of this study reveal the effect of slow freezing on the micronutrients related to the nutritional value of peas, corn, and figs, showing a clear variation between the loss and increase in the levels of these compounds, with statistically significant differences observed among the samples. Regarding Vitamin C, the highest non-significant loss was recorded in peas, while corn showed a significant decrease of 6%, and figs exhibited the least loss, with only a 3% reduction. In contrast, the content of Vitamin A increased in the frozen samples, doubling in peas, increasing by 2.4 times in corn, and 3.5 times in figs. The antioxidant activity (DPPH) also increased by 4.4% in peas, 6% in corn, and 11% in figs, reflecting the efficiency of figs in preserving phenolic compounds due to their richness in sugars and natural antioxidants. As for starch, it decreased by 10% in peas and 8.1% in corn, while no significant change was observed in figs. Similarly, the total amino acids decreased by 15% in peas and 9.4% in corn, due to the leakage of soluble components from damaged cells. In terms of food safety, the levels of nitrates and nitrites remained stable, with no nitrites detected (less than 1 mg/kg) in all samples, confirming the absence of microbial contamination in the product.

Keywords: Vitamin C, Vitamin A, Starch, Antioxidant Capacity, Cellular Degradation.

Copyright **:**Latakia University journal (formerly Tishreen) -Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

[*] **PhD student, faculty of Agricultural Engineering, Latakia University(formerly Tishreen), Latakia, Syria.**
[**] **Professor, faculty of Agricultural Engineering, Latakia University(formerly Tishreen), Latakia, Syria.**
[***] **Associate Professor, Latakia University(formerly Tishreen), Latakia, Syria., Latakia University, Syria**

تأثير التجميد البطيء على القيمة الغذائية ومضادات الأكسدة في بعض الخضروات والفواكه: دراسة مقارنة على البازلاء، الذرة، والتين.

حنان عيسى [*]
د. رامز محمد [**]
د. علي علي [***]

(تاريخ الإيداع 21 / 2 / 2026. قبل للنشر في 21 / 4 / 2026)

□ ملخّص □

تكشف نتائج هذه الدراسة عن تأثير التجميد البطيء في المركبات الدقيقة المرتبطة بالقيمة الغذائية لكل من البازلاء، والذرة، والتين، حيث أظهرت تبايناً واضحاً بين الفقدان والزيادة في مستويات هذه المركبات مع وجود فروقات إحصائية معنوية بين العينات. فيما يخص فيتامينC ، سُجل أعلى فقدان غير معنوي في البازلاء، بينما سجلت الذرة انخفاضاً معنوياً بنسبة 6%، وجاء التين في المرتبة الأقل فقداناً بنسبة 3% فقط. على العكس من ذلك، ارتفع محتوى فيتامين A في العينات المجمدة، حيث تضاعف مرتين في البازلاء، و2.4 مرة في الذرة، و3.5 مرات في التين. كما زاد النشاط المضاد للأكسدة (DPPH) بنسبة 4.4% في البازلاء، و6% في الذرة، و11% في التين، مما يعكس كفاءة التين في الحفاظ على المركبات الفينولية لغناه بالسكريات ومضادات الأكسدة الطبيعية. أما النشا، فانخفض بنسبة 10% في البازلاء و8.1% في الذرة، بينما كان التغير غير معنوي في التين. كذلك انخفضت الأحماض الأمينية الكلية بنسبة 15% في البازلاء و9.4% في الذرة، نتيجة تسرب المكونات الذائبة من الخلايا التالفة. وفي سياق السلامة الغذائية، بقيت مستويات النترات والنتريت مستقرة، مع عدم كشف عن النتريت (أقل من 1 مغ/كغ) في جميع العينات، مما يؤكد خلو المنتج من التلوث الميكروبي.

الكلمات المفتاحية: فيتامينC ، فيتامين A، النشا، القدرة المضاد للأكسدة، تدهور الخلايا.

حقوق النشر : مجلة جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)- سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص CC BY-NC-SA 04

[*] **طالب دكتوراة ، كلية الهندسة الزراعية، جامعة اللاذقية(تشرين سابقاً) ، اللاذقية، سوريا.** hanan219522@gmail.com
[**] **أستاذ، كلية الهندسة الزراعية، جامعة اللاذقية(تشرين سابقاً) ، اللاذقية ، سوريا.**
[***] **أستاذ مساعد ، كلية الهندسة الزراعية، جامعة اللاذقية(تشرين سابقاً) ، اللاذقية، سوريا.**

مقدّمة:

تعتبر الفاكهة والخضار مصادر ممتازة للعناصر الغذائية الأساسية مثل المعادن والفيتامينات ومضادات الأكسدة المختلفة والبولي فينول مما يوفر فوائد صحية وتغذوية في معظم الفاكهة والخضروات [20]

ويستمر التنفس على المستوى الخلوي وبالتالي فهي تعتبر كائنات حية، وتعد عملية الاستهلاك الذاتي في الفاكهة والخضراوات مسؤولة عن تقليل مدة الصلاحية وزيادة التعرض للتلف وعلاوة على ذلك فإن محتوى الرطوبة العالي في الفاكهة والخضراوات وارتفاع قيم نشاطها المائي يدعم بسهولة التفاعلات الكيميائية والنشاط الميكروبي مما يؤدي إلى زيادة التعرض للتلف وفقدان الجودة [21]. يعد التجميد الطريقة الأنسب للحفاظ على القيمة الغذائية والصفات الحسية للفاكهة والخضار الطازجة، حيث يحافظ عليها عن طريق تثبيط نمو الأحياء الدقيقة وتأخير نشاط الإنزيم المتحلل ذاتياً [20].

لتعزيز فعالية التجميد، يُستخدم السلق كمعالجة مسبقة شائعة في الصناعات الغذائية، لا سيما للخضروات والفواكه، وذلك لتعطيل الإنزيمات المسؤولة عن التدهور enzymatic (كالبيروكسيديز والليبوكسيجيناز)، والحفاظ على اللون، وثبات القوام، وتخفيض الحمل الميكروبي، وطرد الهواء بين الخلايا[1,4,7,10,14,16,18] .

من الناحية التغذوية، تُعد الفواكه والخضروات مصادر غنية بالمركبات الفينولية والأنثوسيانينات ومضادات الأكسدة، التي تلعب دوراً حيوياً في محاربة الجذور الحرة وحماية الخلايا من التلف الأكسدي [5]. ومع ذلك، فإن هذه المركبات حساسة للحرارة والضوء والأكسجين، وقد تتأثر سلباً خلال المعالجة والتخزين. فعلى سبيل المثال، أظهرت دراسة(Gonzalez et al,2003) على التوت الأحمر أن الصنف المتأخر الحصاد يحتفظ بمستويات أعلى من الأنثوسيانينات الكلية بعد التجميد مقارنةً بالصنف المبكر، مما يشير إلى تأثير التوقيت الحصادي على القيمة الغذائية [11]. كما أثبتت Howard (1999) أن المعالجة الفورية للخضروات بعد الحصاد عبر السلق بالبخار والتجميد السريع تسمح بالاحتفاظ بأكثر من 70% من المركبات الفينولية والبيتا–كاروتين خلال التخزين الطويل.

أما فيتامين C، فهو أحد أكثر العناصر الغذائية عرضة للتحلل بعد الحصاد، حيث تفقد البازلاء الخضراء حتى 51% من محتواه خلال 24–48 ساعة الأولى، رغم أن التبريد يُبطئ هذا التحلل [15]. وتُشكل الطرق التقليدية غير المُحسَّنة للغليان والتجميد خطراً كبيراً على جودة المنتج النهائي، إذ تؤدي إلى فقدان ملحوظ في القوام، والمواد الغذائية الذائبة، والصبغات، والمركبات العطرية، بالإضافة إلى تدمير الهيكل الخلوي بسبب تكوين بلورات ثلجية ضخمة [6,8,19]. ولذلك، فإن تطوير وتطبيق تقنيات متقدمة للغليان والتجميد تجمع بين التحكم الدقيق في درجة الحرارة، ومدة المعالجة، وظروف ما قبل التجميد يُعد ضرورة حتمية لضمان الحفاظ الأمثل على القيمة الغذائية والخصائص الحسية للمنتجات النباتية المجمدة.

أهمية البحث وأهدافه:

يُعد التجميد من أكثر طرق الحفظ شيوعاً في الصناعات الغذائية، نظراً لقدرته على الحفاظ على المكونات الغذائية والخصائص الحسية للخضروات والفواكه لفترات طويلة. ومع ذلك، فإن طريقة التجميد خاصةً التجميد البطيء تُشكل عاملاً حاسماً في تحديد مدى الحفاظ على الجودة الغذائية، حيث يؤدي إلى تكوين بلورات ثلجية كبيرة تُتلف الهيكل

الخلوي، مما قد يزيد من فقدان العصائر والمواد الذائبة، بما يعزز تدهور المركبات الحساسة مثل فيتامين C, A، والمركبات الفينولية أو تحسن في فاعلية بعضها الآخر. وعلى الرغم من انتشار التجميد السريع في المصانع، لا يزال التجميد المنزلي والبعض من عمليات التجميد في المناطق ذات البنية التحتية المحدودة بما في ذلك مناطقنا يعتمد بشكل كبير على التجميد البطيء، مما يجعل فهم تأثيره على القيمة الغذائية أمراً ضرورياً من الناحية الصحية والاقتصادية.

وبالتالي، فإن هذا البحث يُسهم في سد هذه الفجوة من خلال تقديم بيانات تجريبية موثوقة تُمكّن المزارعين، ومُصنعي الأغذية، وصانعي السياسات الصحية من اتخاذ قرارات مستنيرة بشأن طرق الحفظ المناسبة، خاصة في المناطق التي لا تتوفر فيها تقنيات التجميد المتقدمة.

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير التجميد البطيء (التقليدي) على القيمة الغذائية لبعض الخضروات والفاكهة من خلال تحقيق الأهداف التالية:

1. تقييم تأثير التجميد البطيء على المكونات الغذائية الحيوية (مثل فيتامينC ، فيتامينA ، النشا، والأحماض الأمينية) في عينات من البازلاء(*Pisum sativum* L.) ، الذرة(*Zea mays* L.) ، والتين.(*Ficus carica* L.)
2. مقارنة درجة الاستقرار الغذائي بين الخضروات والفواكه المجمدة بعد التجميد البطيء، بهدف تحديد الأنواع الأكثر عرضة أو مقاومة للتلف الغذائي.
3. تحليل التغيرات في النشاط المضاد للأكسدة باستخدام اختبارDPPH ، وتقييم العلاقة بين هذه التغيرات ومستويات المركبات الفينولية والكاروتينويدات قبل وبعد التجميد.
4. تقديم توصيات عملية لتحسين جودة المنتجات النباتية المجمدة في البيئات ذات الموارد المحدودة، بناءً على نتائج التحليل الغذائي والمناقشات العلمية.

طرائق البحث ومواده:

1. مواد البحث:

جمعت عينات من الذرة *Zea mays L* والبازلاء *Pisum sativum L* وثمار التين *Ficus carica L* من بستان في منطقة جبلة/قرفيص. غلفت العينات بأكياس محكمة الإغلاق، ونقلت إلى المختبر لإجراء الاختبارات. ومن ثم التجميد على حرارة −18 °C والتخزين لمدة 6 أشهر.

1.1 إعداد وتحضير العينات وتجميدها:

- إجراء عمليات الفرز والغسل والتقطيع لحبوب عرانيس الذرة في مرحلة النضج التجارية، واستخراج حبوب البازلاء من القرون.
- تعطيل النظام الإنزيمي بإجراء عملية تسخين أولي لحبوب البازلاء والذرة المدروسة في حمام مائي 80 درجة مئوية لمدة 10 دقائق.
- تقطيع ثمار التين إلى نصفين متماثلين، ثم معالجة القطع بنقعها في محلول حامض الأسكوربيك المصنع تجارياً قبل تجميدها.
- تحضير محلول من مسحوق حمض الأسكوربيك السابق ذكره بتركيز0.3% (وزن/حجم) لكل ليتر من الماء البارد.

- التجميد البطيء للعينات في المجمدة (فريزر منزلي تقليدي) عند درجة حرارة (−18) درجة مئوية حتى تمام التجمد لكامل أجزاء العيناتوتم حفظ العينات في أكياس بلاستكية محكمة الاغلاق .
- تم تخزين العينات المجمدة (بطريقة التجميد البطيء) في الفريزر عند درجة حرارة ثابتة مقدارها −18 درجة مئوية لمدة ستة أشهر.
- إعادة الإذابة (فك التجميد) الطبيعية للعينات بشكل متدرج (بالغمر باستخدام محلول من الإيثانول 40% في الماء أو باستخدام محلول ملحي تركيز 20% موضوع في الدرجة −5 درجة مئوية في الفريزر) وذلك للوصول المتدرج وبشكل بطيء إلى درجة حرارة الغرفة.

إجراء كافة التحاليل والتقديرات المقررة على العينات قبل البدء بتجميدها، ثم مرةً ثانية بعد إعادة إذابتها وفق برنامج التخزين تحت التجميد المقرر وفق خطة العمل.

2. طرائق البحث:

تقدير النسبة المئوية للرطوبة: استخدمت طريقة التجفيف بالفرن عند درجة حرارة 1±105 درجة مئوية حيث تم حساب النسبة المئوية للرطوبة بتطبيق القانون التالي: (AOAC. 2007) [22]

$$\text{الرطوبة \%} = \frac{\text{وزن العينة قبل التجفيف} - \text{وزن العينة بعد التجفيف وحتى ثبات الوزن}}{\text{وزن العينة قبل التجفيف}} \times 100$$

تقدير نسبة الحموضة التنقيطية: استخدمت طريقة المعايرة التنقيطية لمحلول من ماءات الصوديوم معلوم العيارية (N 0.1) بوجود دليل الفينول فيثالين. وتم تقدير نسبة الحموضة التنقيطية على أساس حمض ستريك في العينات من خلال القانون التالي:(AOAC. 2007) [22]

$$\text{الحموضة \%} = \frac{\text{الحجم المستهلك من NaOH} * \text{N 0.1} * 64.03}{\text{وزن العينة الجافة}} \times 100$$

تقدير النسبة المئوية للبروتينات الكلية: استخدمت الطريقة غير مباشرة طريقة كلداهل عن طريق تقدير الأزوت ومن ثم الضرب بمعامل البروتين 5.75. وتم تقدير نسبة البروتينات الكلية من خلال القانون التالي:[22]

$$\text{البروتين \%} = \frac{\text{الحجم المستهلك من HCL} * \text{N 0.1} * 1.4}{\text{وزن العينة الجافة}} \times 5.75$$

تقدير الأحماض الأمينية الكلية بطريقة نينهيدرين (Ninhydrin Method): يتفاعل نينهيدرين مع المجموعة الأمينية الحرة (في الأحماض الأمينية أو البروتينات المهضومة) ليُشكّل مركبا أرجوانيا يُسمى روهمانين (Ruhemann's purple)، يُقاس عند 570 نانومتر. تُهضم العينة بحمض الهيدروكلوريك N6 لمدة 24 ساعة (لتحرير الأحماض الأمينية من البروتين). يُنزع الحمض بالتبخير. يُعاد إذابة الراسب في ماء مقطر. يُضاف محلول نينهيدرين (0.2% في إيثانول). يُسخن الخليط عند 100°م لمدة 15 دقيقة. يُبرد، ويُقاس الامتصاص عند 570 نم. يُحسب التركيز من منحنى قياسي (الجليسين). ويتم الحساب وفق القانون التالي:

$$\text{الأحماض الأمينية مع/100غ} = \frac{\text{الامتصاصية الضوئية لمستخلص العينة} \times \text{حجم مستخلص العينة} \times \text{نسبة التمديد} \times 100}{\text{معامل الامتصاص المولي} \times \text{وزن العينة الجاف بملغ} \times \text{الحجم المأخوذ للتفاعل اللوني} \times 1000}$$

تقدير النسبة المئوية للرماد: استخدمت طريقة الترميد بالفرن عند درجة حرارة 550 درجة مئوية لمدة 3 ساعات حيثُ تم تقدير نسبة الرماد في العينات من خلال القانون التالي:(AOAC. 2007) [22]

$$\text{الرماد \%} = \frac{\text{وزن البوتقة مع العينة قبل الترميد} - \text{وزن البوتقة مع العينة بعد الترميد}}{\text{وزن العينة الجافة}} \times 100$$

تقدير النسبة المئوية للسكريات الكلية: استخدمت الطريقة اللونية من خلال مفاعلة السكريات مع كاشف الأنثرون بوسط حمضي وقياس الامتصاصية باستخدام جهاز السبيكتروفوتومتر عند الطول الموجي 620 نانومتر حيثُ تم تقدير نسبة السكريات في العينات من خلال القانون التالي:(AOAC. 2007)[22]

$$\text{السكريات \%} = \frac{\text{الامتصاصية الضوئية لمستخلص العينة} * \text{حجم مستخلص العينة} * \text{نسبة التمديد} * 100}{\text{معامل الامتصاص المولي} * \text{وزن العينة الجاف بملغ} * \text{الحجم المأخوذ للتفاعل اللوني} * 1000}$$

تقدير النشاء: استخدمت طريقة الحلمهة الحامضية للعينة ومن ثم طبقت طريقة تقدير السكريات الكلية وتم حساب النشاء من خلال القانون التالي:(AOAC. 2007) [22]

النشاء%= السكريات الكلية بعد الحلمهة% – السكريات الكلية قبل الحلمهة%

تقدير نسبة فيتامين C: تعتمد هذه الطريقة على أكسدة حمض الأسكوربيك (الشكل المختزل لفيتامينC) إلى حمض الديهيدروأسكوربيك (الشكل المؤكسد)، ثم تفاعل حمض الديهيدروأسكوربيك مع كاشف 2,4–دينيتروفينيل هيدرازين (DNPH)لتكوين مشتق أوزازون ملون ذي لون أحمر–بني، يتم قياس شدة امتصاصه طيفياً عند طول موجي 520 نانومتر(AOAC. 2007) [22].

تركيز فيتامين C في العينة (ميكروغرام/مل) = (امتصاص العينة – تقاطع Y) / ميل المنحنى

إجمالي فيتامين C (ملغ/100 غرام عينة) = (التركيز × حجم المستخلص الكلي × عامل التخفيف × 100) / وزن العينة

تقدير النسبة المئوية للألياف: استخدمت طريقة الغلي بالحامض والقلوي المخففين ومن ثم ترميد الباقي على ورقة الترشيح على أن تكون ورقة الترشيح عديمة الرماد. وتم تقدير نسبة الألياف في العينات من خلال القانون التالي: (AOAC. 2007) [22]

$$\text{ألياف \%} = \frac{\text{وزن ورقة الترشيح مع الألياف قبل الترميد} - \text{وزن ورقة الترشيح مع المتبقي من الترميد}}{\text{وزن العينة الجافة}} \times 100$$

تقدير الفينولات الكلية: تم تقدير الفينولات الكلية في مستخلص العينات وتم قياس إجمالي محتوى البولي فينول عند الطول الموجي 765 نانومتر وفقًا لطريقة (Folin–Ciocalteu). تم التعبير عن النتائج ملغ حمض الغاليك (GAE) لكل جرام من الوزن الجاف (DWB) (AOCS, 2004) [3].

تقدير القدرة المضادة للأكسدة: استخدام لتقدير القدرة المضادة فعالية الكبح الجذري Radical Scavenging: Assay DPPH تم تقييم فعالية الكبح الجذري DPPH في مستخلص أزهار الزمزريق وتم قياس الامتصاصية عند

517 نانومتر. ثنائي فينيل بيكريل هيدرازيل Di Phenyl Picryl Hdrazyl (DPPH) وتم تقييم النتائج على أساس فعالية الكبح الجذريIC50% $RSAmg/100ml$ واستخدم حمض الأسكوربيك كمركب المرجعي، والمعروف أنه يُظهر نشاط إزالة الجذور الحرة DPPH عند 0.003 IC50 ملغ/مل(AOCS, 2004)[3].

<u>طريقة كاروتين الكلوروفورمية (لتقدير بيتا كاروتين كمؤشر لفيتامين A)</u>: يعتمد على استخلاص الكاروتينات من العينة بمذيبات عضوية (مثل الكلوروفورم أو الهكسان)، ثم قياس الامتصاصية الطيفية عند 450 نم، حيث يمتص بيتا كاروتين الضوء بشكل مميز. يُستخلص بيتا كاروتين بمزيج من الإيثانول + الهكسان. يُفصل الطور العضوي، ويُجفف ويُعاد إذابة الراسب في الكلوروفورم. يُقاس الامتصاص عند 450 نم. يُحسب التركيز باستخدام معامل امتصاص مولي لبيتا كاروتين:(AOCS, 2004) [3]

$$\text{بيتا كاروتين ميكروغرام/مل} = \frac{\text{الامتصاصية الضوئية لمستخلص العينة} \times \text{حجم مستخلص العينة} \times \text{نسبة التمديد} \times 10}{2592}$$

حيث: 2592 هو معامل الامتصاص النوعي لبيتا كاروتين في الكلوروفورم.

<u>تقدير النتريت باستخدام الطريقة اللونية غريس المعدلة (كنتريت صوديوم)</u>: يُنقل 1 مل من رشاحة مستخلص العينة إلى أنبوب زجاجي نظيف، ويُضاف 1 مل من الكاشف اللوني I ويُترك الأنبوب في مكان مظلم لمدة 5 دقائق لتكوين مركب الديازونيوم، ثم تُضاف 0.1 مل من حمض كلور الماء (5M) ، يليها 0.6 مل من الكاشف اللوني II يُترك المزيج في درجة حرارة الغرفة لمدة 10 دقائق، ثم تُقاس الامتصاصية عند طول موجة 540 نانومتر باستخدام جهاز السبيكتروفوتومتر، وذلك بمقارنة القراءة مع العينة المرجعية (البلانك). حيثُ يتم الحساب نتريت الصوديوم% من خلال المعادلة التالية:(AOCS, 2004) [3]

$$\text{نتريت الصوديوم \%} = \frac{\text{الامتصاصية الضوئية لمستخلص العينة} \times \text{حجم مستخلص العينة} \times \text{نسبة التمديد} \times 100}{\text{معامل الامتصاص المولي} \times \text{وزن العينة الجاف بملغ} \times \text{الحجم المأخوذ للتفاعل اللوني} \times 1000}$$

<u>تقدير النترات (كنترات صوديوم)</u>: الخطوة الأولى في التقدير هي إرجاع نترات الصوديوم إلى نتريت، ويتم ذلك بنقل 1 مل من الرشاحة إلى أنبوب زجاجي نظيف، ثم يُضاف 0.5 مل من محلول الأمونيا و0.5 غ من معدن الزنك، وتُمزج المكونات جيداً لمدة 5 دقائق. بعد ذلك، تُرشح الطبقة الطافية، ويتم قياس تركيز النتريت الناتج بنفس الطريقة المذكورة "تقدير النتريت". وأخيراً، يُطرح تركيز النتريت المقاس سابقاً (قبل الإرجاع) من التركيز الكلي الناتج بعد الإرجاع، ليتم الحصول على تركيز النترات. ويتم ذلك من خلال القانون التالي:(AOCS, 2004) [3]

نترات الصوديوم% = نتريت الصوديوم الكلي بعد الإرجاع% – نتريت الصوديوم قبل الإرجاع%

النتائج والمناقشة:

1. تقدير المكونات الغذائية في المادة الطازجة (قبل التجميد):

تُظهر نتائج التحليل للعينات الطازجة (البازلاء، الذرة، التين) تنوعاً واضحاً في التركيب الجدول (1)، يعكس طبيعة كل محصول من الناحية الفسيولوجية والوظيفية. ويُعد هذا التنوع عاملاً حاسماً في تحديد مدى حساسية كل عينة للتغيرات التي قد تطرأ عليها نتيجة عمليات الحفظ مثل التجميد البطيء.

سُجلت أعلى نسبة رطوبة في التين(79.0%) ، تليها البازلاء(78.0%) ، ثم الذرة .(76.0%) تشير هذه القيم إلى أن الفواكه والخضروات الطازجة تحتفظ برطوبتها العالية، وهي مؤشر على جودتها وطراوتها. ومع ذلك، فإن ارتفاع محتوى الماء يجعل هذه المواد أكثر عرضة لتلف هيكلها الخلوي أثناء التجميد، خاصةً عند استخدام التبريد البطيء، حيث يؤدي تكوّن بلورات ثلجية كبيرة إلى تمزق الجدران الخلوية وفقدان العصارة بعد الذوبان .(Fellows, 2017) ومن المتوقع أن تكون البازلاء والتين الأكثر تضرراً من حيث فقدان القوام، بينما قد تكون الذرة أقل عرضة بسبب كثافة بنية حبوبها.

تميّزت البازلاء بأعلى محتوى من الألياف (5.10%)، تليها التين(2.90%) ، ثم الذرة .(2.40%) يُعد هذا الترتيب متوقعاً، فالألياف مرتفعة في البقوليات والفواكه المجففة أو شبه المجففة. وتُعزى الألياف العالية في البازلاء إلى وجود كمية كبيرة من الهيميسيلولوز واللجنين، مما يجعلها خياراً ممتازاً لتحسين الصحة الهضمية وتقليل خطر الإصابة بأمراض القلب[17] . أما التين، فهو معروف تقليدياً بخصائصه المسهلة، والتي تعود جزئياً إلى غناه بالألياف.

يُظهر التين تفوقاً واضحاً في السكريات الكلية (14.0%)، وهو ما يتماشى مع طبيعته كفاكهة ناضجة غنية بالفركتوز والجلوكوز. هذا المحتوى العالي يمنح التين قوة تحلية طبيعية، لكنه قد يزيد من حساسيته لأكسدة السكريات وتكوين مركبات غير مرغوب فيها خلال التخزين الطويل.

في المقابل، تتميز الذرة بارتفاع محتواها من النشا(18.5%) ، مما يجعلها مصدراً رئيسياً للطاقة، بينما تحتوي البازلاء على نشا متوسط (12.0%)، يدل على توازن بين النضج والقيمة البروتينية. انخفاض النشا في التين (1.8%) هو أمر طبيعي، نظراً لتحوله الكامل إلى سكريات خلال النضج.

سُجل أعلى نشاط مضاد للأكسدة في التين(70.0%) ، يليه الذرة(62.0%) ، ثم البازلاء .(55.0%) يُعزى هذا التفوق في التين إلى احتوائه على تركيز عالٍ من البوليفينولات، الأنثوسيانينات، والمركبflavonols ، وخاصة في الأصناف الداكنة .[11] أما الذرة الصفراء، فهي غنية بمركبات مثل الزياثين واللايكوبين، إضافة إلى الفلافونويدات، مما يفسر نشاطها المضاد للأكسدة الجيد. هذه المركبات تلعب دوراً وقائياً ضد الأمراض المزمنة، وتُعد من المؤشرات الحيوية المهمة للجودة الوظيفية.

كانت الحموضة الكلية أعلى بكثير في التين (0.80%) مقارنة بالبازلاء (0.25%) والذرة (0.18%). تعكس هذه القيمة طبيعة التين كفاكهة حمضية، حيث تساهم الأحماض العضوية (مثل الماليك والستريك) في استقرار صبغاتها ونكهتها المنعشة. كما أن الحموضة العالية قد تُساعد في تثبيط بعض الكائنات الضارة، مما يحسن الاستقرار الميكروبي للمنتج أثناء التخزين.

فيتامين A: كانت الذرة هي الأعلى (0.45 مغ/100غ)، وذلك بسبب لونها الأصفر الغني بالكاروتينات، بينما كانت القيم في البازلاء (0.10) والتين (0.12) منخفضة نسبياً. يُعد بيتا كاروتين أحد مضادات الأكسدة الأساسية، ودوره في تحويله إلى فيتامين A في الجسم يدعم صحة العيون والمناعة.

فيتامين C: تميزت الذرة (18.0 مغ/100غ) بأعلى محتوى، تليها التين (6.8 مغ/100غ)، ثم البازلاء (2.0 مغ/100غ) .يُعد هذا الترتيب مفاجئاً نسبياً، لأن البازلاء غالباً ما تُعتبر مصدراً جيداً لفيتامينC ، لكنه يشير إلى أن الذرة الطازجة يمكن أن تكون مصدراً مهماً لهذا الفيتامين، خاصةً عند تناولها طازجة. وفيتامين C حساس جداً للتدهور، لذلك فإن أي عملية تجميد يجب أن تُحافظ عليه قدر الإمكان.[15] سُجل أعلى محتوى من الأحماض الأمينية في الذرة (480 مغ/100غ)، تليها التين (320 مغ/100غ)، ثم البازلاء (200 مغ/100غ) .رغم أن البازلاء

تُعرف بأنها غنية بالبروتين، إلا أن القياس هنا يشمل الأحماض الأمينية الحرة (free amino acids)، وليس البروتين الكلي. وقد يُفسّر هذا الترتيب بكون الذرة تحتوي على أحماض أمينية حرة عالية مثل الجلوتامين والألانين، والتي تساهم في النكهة(umami) ، بينما في البازلاء يكون معظم البروتين على شكل كتل بروتينية لا تتحرر كأحماض حرة إلا بعد التحلل.

النترات :كانت البازلاء هي الأعلى (60 مغ/كغ)، تليها الذرة (40)، ثم التين (30). تُعد هذه القيم ضمن الحدود الآمنة (350> :EFSA مغ/كغ)، ولا تمثل خطراً صحياً مباشراً.

النتريت :لم يُكشف عنه في أي عينة (1>) مغ/كغ، وهو دليل قوي على سلامة جميع العينات من التلوث الميكروبي، وعدم حدوث تحويل إنزيمي للنترات، مما يؤكد جودة عالية في سلسلة الحصاد والنقل.

الجدول (1) المكونات الغذائية في الثمار الطازجة (قبل التجميد).

المؤشر	البازلاء	الذرة	التين
الرطوبة%	78.0 ± 0.6	76.0 ± 0.4	79.0 ± 0.5
الألياف الغذائية%	5.10 ± 0.15	2.40 ± 0.08	2.90 ± 0.10
السكريات الكلية%	5.00 ± 0.18	4.20 ± 0.15	16.0 ± 0.6
القدرة المضاد للأكسدة DPPH%	55.0 ± 1.6	62.0 ± 1.8	70.0 ± 2.0
الحموضة الكلية	0.25 ± 0.01	0.18 ± 0.01	0.80 ± 0.03
النشا%	12.0 ± 0.4	18.5 ± 0.3	1.80 ± 0.07
النترات مغ/كغ	60 ± 3	40 ± 2	30 ± 2
النتريت مغ/كغ	<1	<1	<1
فيتامين A بيتا كاروتين مغ/100غ	0.10 ± 0.01	0.45 ± 0.02	0.12 ± 0.01
فيتامين C مغ/100غ	2.0 ± 0.1	18.0 ± 0.7	6.8 ± 0.3
الأحماض الأمينية الكلية مغ/100غ	200 ± 9	480 ± 20	320 ± 15

تقدير المكونات الغذائية في الثمار بعد التجميد:

يظهر الجدول (2) المكونات بعد التجميد لمدة 6 أشهر حيثُ يلاحظ انخفاض في جميع المكونات عما كانت علية قبل التجميد.

الجدول (2) المكونات الغذائية في الثمار الطازجة (بعد التجميد).

المؤشر	البازلاء	الذرة	التين
الرطوبة%	74.2 ± 0.6	72.0 ± 0.5	77.2 ± 0.5
الألياف الغذائية%	5.30 ± 0.18	2.50 ± 0.10	3.05 ± 0.12
السكريات الكلية%	4.70 ± 0.20	4.00 ± 0.18	15.2 ± 0.7
القدرة المضاد للأكسدة DPPH%	57.42 ± 1.9	65.72 ± 2.0	77.7 ± 2.2
الحموضة الكلية	0.26 ± 0.01	0.19 ± 0.01	0.81 ± 0.03
النشا%	10.8 ± 0.5	17 ± 0.4	1.73 ± 0.08
النترات مغ/كغ	61 ± 3	41 ± 2	31 ± 2
النتريت مغ/كغ	<1	<1	<1
فيتامين A بيتا كاروتين مغ/100غ	0.2 ± 0.01	1.125 ± 0.03	0.42 ± 0.01
فيتامين C مغ/100غ	1.8 ± 0.1	17 ± 0.8	6.6 ± 0.3
الأحماض الأمينية الكلية مغ/100غ	170 ± 11	434.9 ± 25	308.8 ± 18

ويُظهر التحليل المقارن بين القيم قبل وبعد التجميد البطيء أن جميع العينات الثلاث تأثرت سلباً، لكن بدرجات متفاوتة تعكس خصائصها الفسيولوجية والكيميائية الفريدة. ويمكن تلخيص النتائج بالجدول (3).

حيثُ كانت فيتامينات A و C الأكثر تضرراً في جميع العينات، وهو أمر متوقع نظراً لحساسيتهما الشديدة للأكسدة والحرارة والرطوبة.

- فيتامينC: سُجل أعلى انخفاض غير معنوي في البازلاء(10.0%-) ، وكان الانخفاض أقل معنوي في الذرة (6.0%-)، ثم التين.(3.0%-) هذا يعكس أن جميع العينات عرضة لفقدان فيتامينC ، وخصوصاً الذرة والتين، مما قد يُفقدها قيمتها كمصدر لهذا الفيتامين الحيوي. ويعزى هذا التدهور إلى أكسدة حمض الأسكوربيك نتيجة تمزق الخلايا وتحرر الإنزيمات مثل الأسكوربات أوكسيداز.[15]
- فيتامينA: زيادة بنسبة 100.0%+ في البازلاء، 140%+ في الذرة، و250%+ في التين ورغم أن الذرة كانت المصدر الأعلى من حيث القيمة المطلقة (0.45 → 1.125 مغ/100غ)، فإن التين سجّل أعلى نسبة زيادة نسبياً، ويمكن تفسير ذلك بإطلاق الكاروتينات (أثناء الذوبان) من الخلايا التالفة الناجمة عن تلف الخلايا الناتج عن البلورات الكبيرة.[13]

أما بالنسبة للقدرة المضاد للأكسدة: ارتفاع نشاط DPPH في جميع العينات، مما يدل على زيادة المركبات الفينولية والبوليفينولات:

- البازلاء(57.42% ← 55.0) 4.4%+ :
- الذرة(65.72% ← 62.0) 6%+ :
- التين(77.7% ← 70.0) 11%+ :

يُلاحظ أن التين ظل يحتفظ بأعلى نشاط مضاد للأكسدة بعد التجميد، وهو ما يفسر بوجوده الأصلي الغني بالفينولات، إضافةً إلى أن السكريات العالية قد تكون شكّلت بيئة حماية جزئية ضد الأكسدة. في المقابل، تأثرَّ التين بشكل أكبر بسبب ضعف هيكله الخلوي.

وبالنسبة للكربوهيدرات: انخفض النشا بنسبة 10%- في البازلاء، 8.1%- في الذرة، وكان الانخفاض غير معنوي في التين. يُعد تحلل النشا في البازلاء مؤشراً على نشاط إنزيمي متبقي (مثل الأميليز)، أو تفكك البنية البلورية بسبب الضغط الميكانيكي للبلورات الجليدية.

أما السكريات الكلية :انخفضت بنسبة 6 %-في البازلاء، 4.8%-في الذرة، و5- % في التين. يُعزى هذا الفقد إلى الانحلال في العصارة المفقودة أثناء الذوبان، خاصةً في البازلاء ذات الهيكل الرقيق.

انخفضت الأحماض الأمينية الكلية بنسبة 15.0%- في البازلاء، 9.4%- في الذرة، و3.5%- في التين. يشير هذا إلى تسرب المكونات الذائبة من الخلايا التالفة، وهو تأثير مباشر لتجميد بطيء يؤدي إلى بلورات جليدية كبيرة تخرّب الجدران الخلوية.[6]

أما بالنسبة للنترات :ازدياد طفيف (1–3%) في جميع العينات — تغيير غير معنوي، ناتج عن تركيز المادة الجافة.

النتريت :بقي غير مُكتشف (1>) مغ/كغ في جميع الحالات، مما يؤكد استمرار سلامة العينات من التلوث الميكروبي.

الحموضة :ارتفعت أقل من 6% في جميع العينات، وهو ارتفاع ظاهري بسبب فقدان الماء.

الرطوبة :انخفضت بنسبة 4.9%-البازلاء، 5.3%-الذرة، و2.3-% (التين). يُعد هذا الفقد دليلاً مباشراً على تضرر البنية الدقيقة، خاصةً في الخضروات (البازلاء والذرة) مقارنة بالفاكهة (التين)، التي أظهرت مقاومة نسبية.

الألياف :ارتفعت نسبتها ظاهرياً (3–5%) في جميع العينات، لكنها لا تعكس زيادة فعلية، بل تركز المادة الجافة بعد فقدان الماء.

الجدول (3) جدول التحليل الإحصائي للفروقات في نسب المكونات الغذائية نتيجة التجميد.

#	الفرق قبل التجميد وبعدة	t المحسوبة	درجات الحرية	Sig. (2-tailed)	الدلالة الإحصائية
البازيلاء					
1	الرطوبة	68.100	5	0.000	(H_1) دال جداً
2	الألياف	19.593	5	0.000	(H_1) دال جداً
3	السكريات الكلية	11.209	5	0.000	(H_1) دال جداً
4	DPPH	76.448	5	0.000	(H_1) دال جداً
5	الحموضة الكلية	-5.623	5	0.002	(H_1) دال
6	النشا	19.076	5	0.000	(H_1) دال جداً
7	النترات	53.859	5	0.000	(H_1) دال جداً
8	فيتامين A	-6.707	5	0.001	(H_1) دال جداً
9	فيتامين C	1.477	5	0.200	(H_0) غير دال
10	الأحماض الأمينية	23.396	5	0.000	(H_1) دال جداً
الذرة					
1	الرطوبة	64.148	5	0.000	(H_1) دال جداً
2	الألياف	4.658	5	0.006	(H_1) دال
3	السكريات الكلية	9.452	5	0.000	(H_1) دال
4	DPPH	67.536	5	0.000	(H_1) دال جداً
5	الحموضة الكلية	-5.939	5	0.002	(H_1) دال
6	النشا	28.323	5	0.000	(H_1) دال جداً
7	النترات	53.403	5	0.000	(H_1) دال جداً
8	فيتامين A	-9.971	5	0.000	(H_1) دال
9	فيتامين C	30.492	5	0.000	(H_1) دال جداً
10	الأحماض الأمينية	26.225	5	0.000	(H_1) دال جداً
التين					
1	الرطوبة	117.453	5	0.000	(H_1) دال جداً
2	الألياف	7.591	5	0.001	(H_1) دال
3	السكريات الكلية	29.825	5	0.000	(H_1) دال
4	DPPH	42.979	5	0.000	(H_1) دال جداً
5	الحموضة الكلية	-3.136	5	0.026	(H_1) دال
6	النشا	1.100	5	0.321	(H_0) غير دال
7	النترات	39.710	5	0.000	(H_1) دال جداً
8	فيتامين A	-7.856	5	0.001	(H_1) دال
9	فيتامين C	17.942	5	0.000	(H_1) دال جداً
10	الأحماض الأمينية	47.149	5	0.000	(H_1) دال جداً

القيمة الجدولية لـ t من جدول التوزيع 2.571

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

1. انخفضت الفيتامينات القابلة للأكسدة بشكل كبير، حيث فقدت العينات ما بين 10%إلى 3% من فيتامينC، وارتفع فيتامين A من ضعفين الى ثلاث اضعاف، مما يشير إلى حساسية عالية لهذه المركبات للتجميد.
2. تأثر النشاط المضاد للأكسدة (DPPH) بشكل متفاوت، حيث سجّلت البازلاء أقل ارتفاع (4.4+%)، بينما زادت النسبة الى 11+% في التين، مما يدل على دور الحماية النسبية التي توفرها السكريات العالية والمركبات الفينولية.
3. انخفض محتوى النشا بشكل ملحوظ، خاصة في البازلاء (-10 %)، ما قد يؤثر في القوام والاستقرار الهيكلي بعد الطهي.
4. تراجعت الأحماض الأمينية الكلية بنسبة تراوحت بين 9.4%(التين) إلى 15.0% (البازلاء)، بسبب تسرب السيتوبلازم من الخلايا المتضررة، وهو مؤشر على فقدان الجودة البروتينية.
5. حافظت المؤشرات الكيميائية المتعلقة بالسلامة (النترات والنتريت) على استقرارها، حيث لم يُكشف عن ظهور النتريت (1>) مغ/كغ، مما يؤكد أن التجميد البطيء لا يُحفّز النشاط البكتيري الضار، وبالتالي فهو آمن من حيث السلامة الميكروبيولوجية.
6. كانت البازلاء الأكثر عرضة للتلف الغذائي، بينما أظهر التين مقاومة نسبية نسبياً، يليه الذرة، مما يعكس تأثير التركيب الكيميائي والبنية الخلوية في تحديد مدى مقاومة المادة للتجميد البطيء.

التوصيات:

1. تشجيع استخدام التجميد السريع قدر الإمكان، أو تطبيق تقنيات مساعدة مثل:
   - التبريد المسبق قبل التجميد.
   - تقليل حجم القطع لتسريع توزيع الحرارة.
   - تحسين دوران الهواء داخل الفريزر المنزلي لتسريع عملية التجميد.

إدخال خطوة المعالجة المسبقة (Blanching) وغمر الفاكهة بمحول حامض الأسكوربيك قبل التجميد، لتعطيل الإنزيمات المسؤولة عن تحلل الفيتامينات والسكريات، ولتقليل الحمل الميكروبي.

التعبئة المحكمة بالأكياس المفرغة من الهواء (Vacuum packaging) لتقليل تعرض المواد للأكسجين، وبالتالي تقليل أكسدة الفيتامينات والكاروتينات.

التوعية الزراعية والتغذوية بأهمية اختيار طرق الحفظ المناسبة، خاصةً للمحاصيل الغنية بالفيتامينات والمضادات الأكسدة، مثل البازلاء والذرة.

إجراء المزيد من الدراسات التطبيقية على مستويات محلية لاختبار تقنيات تجميد محسنة بتكلفة منخفضة، مثل التجميد بالتبريد العميق باستخدام أنظمة صغيرة الحجم، أو الجمع بين التبريد بالهواء المبرد والتعبئة تحت الفراغ.

إدراج التين والفاكهة الغنية بالسكريات كمصدر مفضل للتجميد البطيء، نظراً لمقاومته النسبية مقارنة بالخضروات البقولية.

References:

[1] M. V. Agüero, M. R. Ansorena, S. I. Roura, and C. E. del Valle, "Thermal inactivation of peroxidase during blanching of butternut squash," *LWT - Food Sci. Technol.*, vol. 41, no. 3, pp. 401–407, 2008. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.03.021.

[2] AOAC International, *Official Methods of Analysis*, 20th ed., 2016. [Online]. Available: https://www.aoac.org/official-methods-of-analysis.

[3] AOCS, *Official Methods and Recommended Practices of the AOCS*, 5th ed., American Oil Chemists' Society, 2004. [Online]. Available: https://www.aocs.org/publications.

[4] K. Bahçeci, A. Serpen, V. Gökmen, and J. Acar, "Study of lipoxygenase and peroxidase as indicator enzymes in green beans: Change of enzyme activity, ascorbic acid and chlorophylls during frozen storage," *J. Food Eng.*, vol. 66, no. 2, pp. 187–192, 2005. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.03.008.

[5] A. Castaneda-Ovando, M. L. Pacheco-Hernández, M. E. Páez-Hernández, J. A. Rodríguez, and C. A. Galán-Vidal, "Chemical studies of anthocyanins: A review," *Food Chem.*, vol. 113, no. 4, pp. 859–871, 2009. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.09.004.

[6] B. S. Chassagne, C. Poirier, M. F. Devaux, F. Fonseca, M. Lahaye, G. Pigorini, C. Girault, M. Marin, and F. Guillon, "Changes in texture, cellular structure and cell wall composition in apple tissue as a result of freezing," *Food Res. Int.*, vol. 42, no. 7, pp. 788–797, 2009. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.04.012.

[7] R. M. S. Cruz, M. C. Vieira, and C. L. M. Silva, "Effect of heat and thermosonication treatments on peroxidase inactivation kinetics in watercress (Nasturtium officinale)," *J. Food Eng.*, vol. 72, no. 1, pp. 8–15, 2006. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.11.013.

[8] E. K. Dermesonlouoglou, M. C. Giannakourou, and P. S. Taoukis, "Stability of dehydrofrozen tomatoes pretreated with alternative osmotic solutes," *J. Food Eng.*, vol. 78, no. 1, pp. 272–280, 2007. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.09.024.

[9] P. J. Fellows, *Food Processing Technology: Principles and Practice*, 4th ed., Woodhead Publishing, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/C2015-0-02216-9.

[10] R. L. Garrote, R. A. Bertone, and E. R. Silva, "Comparison of two rapid methods of lipoxygenase assay in blanched green peas, green beans and potatoes," *Food Sci. Technol. Int.*, vol. 7, no. 2, pp. 171–175, 2001. [Online]. Available: https://doi.org/10.1177/108201301772309.

[11] E. M. Gonzalez, B. de Ancos, and M. P. Cano, "Relation between bioactive compounds and free radical-scavenging capacity in berry fruits during frozen storage," *J. Sci. Food Agric.*, vol. 83, no. 7, pp. 722–726, 2003. [Online]. Available: https://doi.org/10.1002/jsfa.1372.

[12] L. A. Howard, A. D. Wong, A. K. Perry, and B. P. Klein, "β-carotene and ascorbic acid retention in fresh and processed vegetables," *J. Food Sci.*, vol. 64, no. 5, pp. 929–936, 1999. [Online]. Available: https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1999.tb15937.x.

[13] Z. Lisiewska, W. Kmiecik, and J. Słupski, "Contents of chlorophylls and carotenoids in frozen dill: Effect of usable part and pre-treatment on the content of chlorophylls and carotenoids in frozen dill (Anethum graveolens L.), depending on the time and temperature of storage," *Food Chem.*, vol. 84, no. 4, pp. 511–518, 2004. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/S0308-8146(03)00278-8.

[14] B. E. F. Morales, V. E. Chandia, and Z. L. Cisneros, "Thermal inactivation kinetics of peroxidase and lipoxygenase from broccoli, green asparagus and carrots," *J. Food Sci.*, vol. 67, no. 1, pp. 146–154, 2002. [Online]. Available: https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb11376.x.
[15] K. M. Philips, M. T. Tarragó-Trani, S. E. Gebhardt, J. Exler, K. Y. Patterson, D. B. Haytowitz, P. R. Pehrsson, and J. M. Holden, "Stability of vitamin C in frozen raw fruit and vegetable homogenates," *J. Food Compos. Anal.*, vol. 23, no. 3, pp. 253–259, 2010. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.jfca.2009.08.003.
[16] X. Saldivar, Y. J. Wang, P. Chen, and A. Mauromoustakos, "Effects of blanching and storage conditions on soluble sugar contents in vegetable soybean," *LWT - Food Sci. Technol.*, vol. 43, no. 9, pp. 1368–1372, 2010. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.04.009.
[17] J. L. Slavin, "Fiber and prebiotics: Mechanisms and health benefits," *Nutrients*, vol. 5, no. 4, pp. 1417–1435, 2013. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/nu5041417.
[18] Ç. Soysal and Z. Sözlemez, "Kinetics and inactivation of carrot peroxidase by heat treatment," *J. Food Eng.*, vol. 68, no. 3, pp. 349–356, 2005. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.06.022.
[19] L. Wu, Y. Ogawa, and A. Tagawa, "Electrical impedance spectroscopy analysis of eggplant pulp and effects of drying and freezing–thawing treatments on its impedance characteristics," *J. Food Eng.*, vol. 87, no. 2, pp. 274–280, 2008. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.12.015.
[20] K. P. Alabi, Z. Zhu, and D.-W. Sun, "Transport phenomena and their effect on microstructure of frozen fruits and vegetables," *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 101, pp. 63–72, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.04.016.
[21] P. K. Jha, E. Xanthakis, S. Chevallier, V. Jury, and A. Le-Bail, "Assessment of freeze damage in fruits and vegetables," *Food Res. Int.*, vol. 121, pp. 479–496, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.12.002.
[22] AOAC, *Official Methods of Analysis*, 18th ed., Association of Official Analytical Chemists, Gaithersburg, MD, USA, 2007.