Vol.4, No.8, Page 2361-2383,2026 https://doi.org/10.59628/jast.v4i8.3050 ISSN 2958-9568 JAST

مجلة جامعة صنعاء للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا
Sana'a University Journal of Applied Sciences and Technology
https://journals.su.edu.ye/index.php/jast/

Moisture Stability and Sensory Quality of Metallized-Packaged Biscuits During Storage: A Comparison with Non-Metallized Packaging in a Single Product

Khaled Mohammed Assag*, Jalal Fadel and Abdulmajid Bajash

Department of Food Science, Faculty of Agriculture, Sana'a University, Sana'a, Yemen.

***Corresponding author:** *khaledassag2016@gmail.com*

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 21- April-2026,
Revised: 7- July -2026,
Accepted: 1- August- 2026
Published: 28 August 2026

Keywords:

1. Biscuits
2. Metallized BOPP
3. Moisture uptake
4. Water activity
5. Sensory properties
6. Longitudinal analysis
7. Mixed-effects model

Abstract:

Biscuits are dry food products that are highly susceptible to moisture uptake during storage due to their porous structure and low initial moisture content, making the control of water vapor transfer a critical factor in maintaining product stability. This study aimed to evaluate the effectiveness of metallized biaxially oriented polypropylene (Metallized BOPP) packaging in reducing moisture uptake through a direct comparison with non-metallized biaxially oriented polypropylene (BOPP) packaging in a single biscuit product, while also monitoring the response of three biscuit products stored under metallized packaging. A longitudinal field study was conducted over a twelve-month period at three storage locations in Yemen. Monthly measurements of moisture content, water activity, and sensory properties were collected, and the data were analyzed using linear mixed models. The results showed that metallized packaging was associated with significantly lower moisture content and water activity compared with BOPP packaging in the product used for the direct packaging comparison, accompanied by a clear improvement in crispness. The analysis also indicated that storage time was the factor most strongly associated with changes in both physical and sensory properties. Among the products stored under metallized packaging only, no significant differences were observed in moisture content, whereas differences were detected in water activity and sensory properties. These findings support the effectiveness of metallized packaging within the limits of a direct comparison conducted on a single product, while highlighting differences in product responses under the same packaging system.

Vol.4, No.5, Page 2103-2121,2026 https://doi.org/10.59628/jast.v4i5.2910 ISSN 2958-9568 JAST

مجلة جامعة صنعاء للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا
Sana'a University Journal of Applied Sciences and Technology
https://journals.su.edu.ye/index.php/jast/

استقرار الرطوبة والخصائص الحسية للبسكويت المعبأ بتغليف مُمعدن أثناء التخزين: مقارنة مع تغليف غير مُمعدن في منتج واحد

خالد محمد عساج، جلال فضل، وعبد المجيد بجاش

قسم علوم الأغذية، كلية لزراعة - جامعة صنعاء، صنعاء، اليمن.

***المؤلف:** khaledassaq2016@gmail.com

معلومات المقالة

تاريخ التقديم: 21 -ابريل -2026
تاريخ القبول:1- اغسطس- 2026
تاريخ النشر: 28- مايو -2026

الكلمات المفتاحية

البسكويت
التغليف الممعدن (Metallized BOPP)
اكتساب الرطوبة
النشاط المائي
الخصائص الحسية
التحليل الطولي
نموذج الانحدار الخطي المختلط

الملخص:

تُعد منتجات البسكويت من الأغذية الجافة الحساسة لاكتساب الرطوبة أثناء التخزين نتيجة بنيتها المسامية وانخفاض محتواها الرطوبي الابتدائي، مما يجعل التحكم في انتقال بخار الماء عاملًا حاسمًا في استقرارها. هدفت هذه الدراسة إلى تقييم كفاءة التغليف القائم على فيلم بولي بروبيلين ثنائي التوجيه الممعدن (Metallized BOPP) في الحد من اكتساب الرطوبة، من خلال مقارنة مباشرة مع تغليف البولي بروبيلين ثنائي التوجيه غير الممعدن (BOPP) في منتج بسكويت واحد، مع تتبع استجابة ثلاثة أنواع من البسكويت تحت التغليف الممعدن. اعتمدت الدراسة تصميمًا طوليًا ميدانيًا امتد اثني عشر شهرًا في ثلاثة مواقع تخزين يمنية، مع قياسات شهرية للمحتوى الرطوبي والنشاط المائي والخصائص الحسية، وتحليل البيانات باستخدام نموذج الانحدار الخطي المختلط. أظهرت النتائج أن التغليف الممعدن ارتبط بانخفاض معنوي في المحتوى الرطوبي والنشاط المائي مقارنة بتغليف BOPP في المنتج الذي أُجريت عليه المقارنة بين نوعي التغليف، مع تحسن واضح في القرمشة كما بيّن التحليل أن الزمن كان العامل الأكثر ارتباطًا بتغير الخصائص الفيزيائية والحسية. وبين المنتجات المخزنة تحت التغليف الممعدن فقط، لم تُسجل فروق معنوية في المحتوى الرطوبي، بينما ظهرت فروق في النشاط المائي والخصائص الحسية. وتدعم النتائج كفاءة التغليف الممعدن ضمن حدود المقارنة المباشرة في منتج واحد، مع اختلاف استجابة المنتجات تحت نظام التغليف نفسه.

1. المقدمة

تُعد منتجات البسكويت من الأغذية الجافة واسعة الاستهلاك، إلا أن استقرارها أثناء التخزين يرتبط ارتباطًا وثيقًا بسلوكها تجاه اكتساب الرطوبة من الوسط المحيط، نتيجة بنيتها المسامية وانخفاض محتواها الرطوبي الابتدائي، مما يجعلها حساسة لفروق ضغط بخار الماء بين المنتج والبيئة المحيطة. يُعد انتقال بخار الماء الآلية الفيزيائية الرئيسة المسؤولة عن تغير المحتوى الرطوبي في هذه المنتجات، حيث يحدث هذا التغير نتيجة فروق الاتزان الرطوبي دون ارتباط مباشر بالنشاط الميكروبي، وإنما بفعل التفاعل بين خصائص المنتج والظروف البيئية المحيطة [1،2]. كما يؤدي تجاوز مستويات معينة من الرطوبة النسبية إلى تسارع الامتصاص الرطوبي وفقدان القوام المميز والقرمشة، حتى في المنتجات منخفضة النشاط المائي [3،4].

يمثل نظام التغليف عاملًا تقنيًا رئيسًا في تنظيم انتقال بخار الماء أثناء التخزين، إذ تتحكم خصائص مادة التغليف، ولا سيما معدل نفاذية بخار الماء، في قدرة العبوة على الحد من اكتساب الرطوبة. تُعد الأغشية البوليمرية الممعدنة، مثل أغشية البولي بروبيلين الموجه ثنائي المحور الممعدن (Metallized BOPP)، من مواد التغليف المستخدمة للمنتجات الجافة الحساسة للرطوبة بسبب قدرتها على خفض انتقال بخار الماء مقارنة بالأغشية البوليمرية غير الممعدنة [2،4،5،6].

رغم وضوح الدور العام للتغليف في الحد من انتقال الرطوبة، فإن العديد من الدراسات اعتمدت على تحليلات وصفية أو ارتباطات مباشرة بين الرطوبة النسبية والمحتوى الرطوبي دون الأخذ في الاعتبار الطبيعة الزمنية التراكمية لعملية الامتصاص، كما لم تميز بشكل كافٍ بين الأثر المستقل لكل من الزمن والعوامل البيئية ونظام التغليف. وقد يؤدي عدم التمييز بين هذه العوامل إلى تضخيم الدور الظاهري لبعض المتغيرات البيئية عند تفسير النتائج، إذ إن اكتساب الرطوبة لا يعتمد فقط على شدة الظروف المحيطة، بل يتأثر أيضًا بمدة تعرض المنتج لهذه الظروف، وتزداد هذه العلاقة تعقيدًا في بيئات التخزين الواقعية بسبب تداخل التغيرات المناخية مع العامل الزمني.

تتمثل الفجوة البحثية في محدودية الدراسات التي تقيّم أداء التغليف الممعدن في ظل تخزين ميداني طويل المدى، مع تحليل متزامن للمحتوى الرطوبي والنشاط المائي والخصائص الحسية، وفصل تأثير الزمن عن تأثير موقع التخزين والرطوبة النسبية باستخدام نموذج إحصائي ملائم للبيانات الطولية [7،8،9،10].

إضافة إلى ذلك، فإن استجابة منتجات البسكويت أثناء التخزين لا تقتصر على تأثير نظام التغليف، بل قد تختلف باختلاف فئة العجين وبعض خصائص التركيبة العامة للمنتج، مما قد يؤدي إلى تباين سلوك المحتوى الرطوبي والنشاط المائي والخصائص الحسية بين المنتجات المختلفة رغم استخدام نظام التغليف نفسه، يشير ذلك إلى أهمية تحليل هذه المتغيرات ضمن إطار تكاملي يسمح بالتمييز بين أثر نظام التغليف واختلاف استجابة المنتجات، مع عدم إسناد

هذه الفروق إلى آليات تركيبية أو بنيوية محددة ما لم تدعمها قياسات مباشرة.

وبناءً على ذلك، تهدف هذه الدراسة إلى تقييم السلوك الزمني للمحتوى الرطوبي والنشاط المائي والخصائص الحسية لثلاثة أنواع من البسكويت المحلي المخزن تحت التغليف الممعدن في ثلاث بيئات مناخية يمنية مختلفة خلال الفترة من أكتوبر 2024 إلى سبتمبر 2025، مع مقارنة تأثير التغليف الممعدن بتغليف BOPP غير الممعدن في منتج بسكويت محلي واحد فقط، هو منتج بسكويت أبو ولد بوصفه منتج المقارنة المتاح تحت نظامي التغليف ضمن التصميم التجريبي. وتكمن إضافة الدراسة في الجمع بين التخزين الميداني طويل الأمد، وقياسات الرطوبة والنشاط المائي والقبول الحسي، ونموذج الانحدار الخطي المختلط (Linear Mixed Model – LMM) الذي يسمح بفصل أثر الزمن وموقع التخزين والرطوبة النسبية عن أثر التغليف واختلاف استجابة المنتجات، دون تعميم أثر نوع التغليف على المنتجات التي لم تُختبر تحت نظام تغليف بديل.

2. المواد وطرق البحث

اعتمدت الدراسة تصميمًا طوليًا ميدانيًا يهدف إلى تتبع التغيرات الزمنية في المحتوى الرطوبي والنشاط المائي (aw) والخصائص الحسية لمنتجات البسكويت المغلفة أثناء التخزين الفعلي ضمن بيئات مناخية متباينة. ويُعد التصميم الطولي مناسبًا لدراسة التغيرات التراكمية في الأنظمة الغذائية الجافة التي تتأثر بالعوامل البيئية بمرور الزمن، إذ يسمح برصد التفاعل بين الزمن والمتغيرات البيئية ضمن سياق تخزين واقعي غير مسرّع [11].

نُفذت الدراسة في ثلاث محافظات تمثل تباينًا مناخيًا واضحًا في الجمهورية اليمنية، هي عدن، والحديدة، وتعز. وقد استُخدمت هذه المواقع بوصفها بيئات تخزين مختلفة تمثل تباينًا في الظروف المناخية المحيطة بالتخزين. وتم إدراج موقع التخزين ضمن المتغيرات التفسيرية في النماذج الإحصائية لتحليل أثر التباين المناخي بين المواقع على الخصائص المدروسة. وامتدت فترة المتابعة إلى اثني عشر شهرًا، من 28 أكتوبر 2024 حتى 27 سبتمبر 2025، مع إجراء قياسات شهرية منتظمة للمحتوى الرطوبي والنشاط المائي والخصائص الحسية، بما يتيح توصيف السلوك الرطوبي بوصفه عملية زمنية تراكمية لا استجابة آنية.

شملت الدراسة ثلاثة أنواع من البسكويت المنتج محليًا، تم اختيارها لتمثيل اختلاف فئة العجين وبعض الخصائص العامة للتركيبة، وهي: بسكويت بعجين صلب (Hard Dough)، وبسكويت بعجين طري (Soft Dough)، وبسكويت بعجين طري مضاف إليه الكاكاو. وعومل كل نوع كوحدة مستقلة ضمن التصميم التجريبي، مع إخضاع جميع العينات لنفس ظروف التخزين. واستُخدم هذا التصنيف بوصفه توصيفًا عامًا للمنتجات، وليس دليلًا مباشرًا على تركيبها الكيميائي أو كثافتها أو مساميتها أو بنيتها المجهرية. وكانت المنتجات من إنتاج شهر سبتمبر 2024، ووُضعت في مواقع التخزين في 1 أكتوبر 2024، وكان عمرها عند بدء التخزين أقل من شهر. أُجريت القياسات الابتدائية عند الشهر صفر قبل بدء

المتابعة الشهرية، وتُعرض القيم الابتدائية للمحتوى الرطوبي والنشاط المائي في الجدول التكميلي (X2).

استُخدم في الدراسة نظام تغليف ممعدن مكوّن من طبقتين: طبقة BOPP مطبوعة بسماكة 20 ميكرومتر، وطبقة BOPP ممعدنة قابلة للحام الحراري (Metallized BOPP HS) بسماكة 15 ميكرومتر، وبسماكة كلية 35 ميكرومتر. واستند توصيف خصائص مادة التغليف إلى بيانات الشركة المصنعة الواردة في النشرة الفنية، والتي أظهرت انخفاض معدل نفاذية بخار الماء ومعدل نفاذية الأكسجين مع زيادة السماكة، إضافة إلى خصائص مناسبة للحام الحراري والتشغيل على خطوط التعبئة، مما يدعم استخدامها في تطبيقات تغليف المنتجات الغذائية الجافة، وذلك لجميع المنتجات ضمن التصميم التجريبي. ويتميز هذا النوع من الأفلام بانخفاض نفاذية بخار الماء مقارنة بالأفلام غير الممعدنة نتيجة وجود طبقة معدنية رقيقة تعزز الأداء الوظيفي للمادة البوليمرية [12، 13].

لغرض تقييم تأثير نوع التغليف، تم إجراء مقارنة مباشرة على منتج أبو ولد فقط بوصفه منتج بسكويت محلي من فئة العجين الطري (Soft Dough)، ومتاحًا ضمن التصميم التجريبي تحت نظامي التغليف، بين نظامي تغليف مختلفين، هما: التغليف الممعدن وتغليف البولي بروبيلين ثنائي التوجيه غير الممعدن (BOPP) بوصفه مجموعة مرجعية، وذلك تحت نفس ظروف التخزين ونفس الفترة الزمنية. أما باقي المنتجات، فقد تم تقييمها تحت نظام التغليف الممعدن فقط دون إجراء مقارنة مع نظام تغليف بديل.

اعتمد قياس المحتوى الرطوبي بوصفه أحد المؤشرات الفيزيائية لتتبع تغيرات الامتصاص الرطوبي أثناء التخزين، وأُجريت القياسات وفق طريقة التجفيف بالفرن المعتمدة من AOAC (AOAC, 2019)، حيث جُففت العينات عند درجة حرارة (105 °م) حتى ثبات الوزن، ثم حُسب المحتوى الرطوبي كنسبة مئوية من الوزن الكلي للعينة [14]. كما تم قياس النشاط المائي (aw) باستخدام جهاز قياس النشاط المائي (Water Activity Meter) من نوع (GYW-1G)، المصنع من قبل شركة Shenzhen Guanya Technology Co., Ltd. (الصين)، وذلك بعد معايرته وفق تعليمات الشركة المصنعة قبل إجراء القياسات، لضمان دقة النتائج وقابليتها للتكرار.

أُجري التقييم الحسي بوصفه اختبارًا للقبول الحسي والجودة المدركة، وليس تحليلًا وصفيًا كميًا كاملًا للخصائص الحسية. شارك في التقييم 16 مقيمًا داخليًا مألوفين بخصائص منتجات البسكويت، تم اختيارهم من العاملين ذوي الخبرة في تقييم منتجات البسكويت داخل الشركة، ولم تُعامل هذه المجموعة بوصفها لجنة وصفية مدربة، وقد استخدموا مقياسًا هدونيًا من تسع درجات لتقييم المظهر والقرمشة والطعم والتقبل الكلي. جرى ترميز العينات بأكواد عشوائية دون إظهار هوية المنتج أو نوع التغليف للمقيمين، كما قُدمت العينات بترتيب عشوائي داخل جلسات التقييم للحد من أثر ترتيب التقديم، وتم تقييم العينات بعد سحبها شهريًا من مواقع التخزين ونقلها إلى مقر التقييم في الشركة، على دفعات منفصلة وفق شهر السحب وموقع التخزين، مع توفير فواصل زمنية قصيرة وماء للمضمضة بين العينات للحد من إرهاق

المقيمين وتقليل أثر انتقال الطعم بين العينات. وبناءً على ذلك، فُسرت النتائج الحسية بوصفها مؤشرات قبول وجودة مدركة داعمة للقياسات الفيزيائية، لا بوصفها تحليلًا وصفيًا حسيًا مستقلًا.

رُصدت الظروف البيئية في مواقع التخزين باستخدام جهاز Govee Hygrometer Thermometer Data Logger (Model H5075) –، المصنع من شركة Govee Technology Co., Ltd., Shenzhen، الصين، والمزوّد بحساسات رقمية لقياس درجة الحرارة ضمن مدى (−20 إلى +60 °م بدقة ±0.3 °م)، والرطوبة النسبية ضمن مدى (0–99% بدقة ±3%). سُجلت القراءات آليًا كل دقيقة بصورة مستمرة، ثم استُخرجت البيانات وحُسبت المتوسطات الشهرية لكل موقع تخزين لربطها زمنيًا بقياسات المحتوى الرطوبي والنشاط المائي.

تم اعتماد ثماني مكررات لكل منتج في كل موقع تخزين عند كل نقطة زمنية، حيث تم تخزين كميات مستقلة من المنتجات وسحب عينات جديدة شهريًا لإجراء القياسات، دون إعادة استخدام نفس العينات عبر الزمن، بما يعكس تصميم سحب إتلافي (destructive sampling) ملائم لطبيعة الدراسة. مثّلت كل عبوة مغلّفة وحدة تجريبية مستقلة، بحيث عُدّت المكررات الثمانية مكررات مستقلة على مستوى العبوات وليست مكررات تحليلية لنفس العينة، وكانت العبوة تُفتح مرة واحدة فقط لإجراء قياسات المحتوى الرطوبي والنشاط المائي والتقييم الحسي ثم تُستبعد من الدراسة.

3. التحليل الإحصائي

خضعت البيانات لتحليل إحصائي باستخدام نموذج الانحدار الخطي المختلط (Linear Mixed Model – LMM)، وهو من الأساليب المناسبة لتحليل البيانات ذات البنية الهرمية أو الطولية، حيث يسمح بتمثيل التباين الناتج عن تجمع الملاحظات ضمن وحدات تجريبية محددة، مع تقدير تأثير العوامل الزمنية والبيئية ضمن نموذج واحد [15، 16].

استُخدم هذا النموذج لتحليل تأثير نوع التغليف على منتج أبو ولد، وكذلك لمقارنة المنتجات المختلفة تحت نظام التغليف الممعدن. وتضمن النموذج متغيرات ثابتة (Fixed effects) شملت نوع التغليف (Packaging) ونوع المنتج (Product) حسب طبيعة التحليل، إضافة إلى الزمن (Month)، وموقع التخزين (City)، والرطوبة النسبية (Relative Humidity) بوصفها متغيرات ضبط، وذلك بهدف تقدير تأثير هذه العوامل على المتغيرات المدروسة.

لم تُعامل القياسات الشهرية بوصفها قياسات متكررة للعبوة الفيزيائية نفسها، لأن الدراسة اعتمدت تصميم سحب إتلافي، إذ كانت العينات المسحوبة في كل شهر عينات مستقلة ممثلة لكل حالة تخزين، لذلك كانت وحدة التحليل هي القياس الفردي للعينة المسحوبة إتلافيًا. في نموذج تأثير نوع التغليف على منتج أبو ولد، حُددت التأثيرات الثابتة في نوع التغليف، والزمن، وموقع التخزين، والرطوبة النسبية، بينما استُخدم اعتراض عشوائي فقط دون ميل عشوائي، وذلك لوحدة التجميع المعرفة بتداخل موقع التخزين × الشهر × نوع التغليف. أما في نموذج مقارنة المنتجات تحت التغليف الممعدن، فقد حُددت التأثيرات الثابتة في نوع المنتج، والزمن، وموقع

التخزين، والرطوبة النسبية، مع استخدام اعتراض عشوائي فقط دون ميل عشوائي لوحدة التجميع المعرفة بتداخل موقع التخزين × الشهر × نوع المنتج. وبسبب طبيعة السحب الإتلافي، لم تُفرض بنية تغاير للقياسات المتكررة على مستوى العبوة نفسها، وإنما استُخدم الاعتراض العشوائي لتمثيل التباين بين العينات المسحوبة ضمن حالة التخزين نفسها.

لاختبار ما إذا كان مسار التغير الزمني في خصائص البسكويت يختلف باختلاف نوع التغليف أو نوع المنتج أو موقع التخزين، أُجريت نماذج إضافية تضمنت التفاعلات الأساسية المرتبطة بالزمن، وهي: نوع التغليف × الشهر، نوع المنتج × الشهر، وموقع التخزين × الشهر، إضافة إلى تفاعلات نوع التغليف × موقع التخزين ونوع المنتج × موقع التخزين عند ملاءمتها لطبيعة النموذج.

شملت المتغيرات التابعة كلًا من المحتوى الرطوبي (Moisture content)، والنشاط المائي (aw)، ومؤشرات القبول الحسي والجودة المدركة، وهي القرمشة، والطعم، والتقبل الكلي. وقد استُخدم التقييم الحسي في هذه الدراسة بوصفه اختبار قبول وجودة مدركة باستخدام مقياس هدوني من تسع درجات، وليس بوصفه تحليلًا وصفيًا كميًا كاملًا للخصائص الحسية. لذلك عوملت درجات القرمشة والطعم والتقبل الكلي، بعد تجميعها على مستوى المكررات، بوصفها مؤشرات كمية تقريبية للقبول والجودة المدركة ضمن حدود تصميم الدراسة. أما متغير المظهر (Appearance)، فقد عومل بوصفه متغيرًا حسيًا رتبيًا محدود التباين، لذلك لم يُدرج ضمن التفسير الرئيس لنتائج الخصائص الحسية، وقد أُجري له تحليل منفصل باستخدام نموذج الانحدار الخطي مع أخطاء معيارية متينة (OLS–HC3) بوصفه تحليلًا داعمًا وحذرًا بعد أن أظهرت نماذج LMM عدم استقرار في التقديرات وعدم تقارب مناسب، وبناءً على ذلك، فُسرت نتائج المظهر بوصفها نتائج مساندة لا تمثل محورًا رئيسًا في الاستدلال الإحصائي.

تم إجراء المقارنات البعدية باستخدام اختبار Tukey المصحح للتحكم في الخطأ الناتج عن تعدد المقارنات. كما تم حساب أحجام التأثير باستخدام معامل Hedges’ g مع فواصل ثقة 95% لتقدير الأهمية العملية للفروق بين المجموعات. وقد حُسبت أحجام التأثير بوصفها مقاييس وصفية تكميلية اعتمادًا على فروق المجموعات والانحرافات المعيارية المجمعة، وليس اعتمادًا على المتوسطات المعدلة المستخرجة من نماذج الانحدار الخطي المختلط. لذلك لا تُفسر قيم Hedges’ g بوصفها معاملات نموذجية معدلة للبنية العنقودية أو الزمنية، بل بوصفها مؤشرات عملية مساندة لحجم الفروق بين المجموعات. أما الاستدلال الإحصائي الرئيس فقد استند إلى نماذج LMM والمقارنات البعدية المضبوطة.

اعتمد مستوى دلالة إحصائية قدره $p \leq 0.05$ معيارًا للحكم على معنوية التأثيرات، كما تم التحقق من ملاءمة النماذج من خلال فحص البواقي

واختبار افتراضات الاعتدالية وتجانس التباين. وتم إجراء جميع التحليلات الإحصائية باستخدام برنامج (SPSS 21).

4. النتائج والمناقشة

الإحصاءات الوصفية لمتغيرات خصائص البسكويت

يوضح الجدول (1) المتوسطات الشهرية لدرجة الحرارة والرطوبة النسبية في مواقع التخزين الثلاثة خلال فترة الدراسة. وتُظهر البيانات تباينًا واضحًا بين المواقع، إذ سجلت عدن والحديدة درجات حرارة ورطوبة نسبية أعلى مقارنة بتعز في معظم أشهر التخزين، مما يدعم توصيف مواقع الدراسة بوصفها بيئات تخزين متباينة.

جدول 1 المتوسطات الشهرية لدرجة الحرارة والرطوبة النسبية في مواقع التخزين خلال فترة الدراسة (أكتوبر 2024–سبتمبر 2025)

Month	Aden Temperature (°C)	Aden RH (%)	Al Hudaydah Temperature (°C)	Al Hudaydah RH (%)	Taiz Temperature (°C)	Taiz RH (%)
Oct-24	32.50 ± 1.60	66.10 ± 4.19	32.10 ± 1.77	64.50 ± 3.52	26.30 ± 1.58	55.20 ± 3.75
Nov-24	30.60 ± 1.70	64.70 ± 4.20	30.30 ± 2.17	63.10 ± 4.18	24.10 ± 1.77	56.80 ± 4.02
Dec-24	29.30 ± 1.68	63.50 ± 3.78	29.10 ± 1.31	62.40 ± 3.22	22.80 ± 1.84	60.50 ± 4.43
Jan-25	28.60 ± 1.50	68.50 ± 3.33	29.40 ± 1.45	66.20 ± 3.04	22.40 ± 1.92	61.30 ± 2.81
Feb-25	29.30 ± 1.69	67.20 ± 3.29	30.10 ± 2.03	65.50 ± 3.59	23.10 ± 1.44	59.80 ± 4.33
Mar-25	30.70 ± 1.93	65.10 ± 3.16	31.20 ± 1.85	63.80 ± 3.23	24.60 ± 1.66	56.70 ± 3.35
Apr-25	32.90 ± 1.57	62.80 ± 3.79	33.50 ± 1.72	61.40 ± 3.64	26.80 ± 1.64	54.20 ± 3.88
May-25	34.60 ± 1.59	61.50 ± 3.56	35.10 ± 1.53	60.20 ± 4.46	28.70 ± 1.47	48.50 ± 3.17
Jun-25	35.80 ± 1.93	69.30 ± 4.21	36.20 ± 2.03	67.80 ± 3.55	29.90 ± 1.90	42.10 ± 3.81
Jul-25	36.40 ± 1.97	64.20 ± 3.57	36.80 ± 1.83	62.50 ± 3.15	30.20 ± 1.73	44.30 ± 3.81
Aug-25	35.90 ± 1.40	69.80 ± 3.82	35.70 ± 1.62	68.10 ± 3.46	28.50 ± 1.95	58.40 ± 4.09
Sep-25	34.70 ± 1.21	68.60 ± 3.86	34.90 ± 1.69	67.20 ± 3.36	27.90 ± 2.16	57.60 ± 3.72

ملاحظة: القيم تمثل المتوسط ± الانحراف المعياري للقراءات الشهرية المسجلة في كل موقع تخزين.

RH = Relative Humidity.

يعرض الجدول (2) القيم الوصفية للمتغيرات الفيزيائية والحسية لمنتجات البسكويت، حيث تم عرض النتائج في جدول موحد وفق نوع المقارنة. تم تجميع البيانات من جميع مواقع التخزين مع إدراج المدينة كمتغير ضبط دون عرضها بشكل منفصل. تُظهر القيم الوصفية تباينًا واضحًا بين أنظمة التغليف والمنتجات، خاصة في المحتوى الرطوبي والنشاط المائي والخصائص الحسية، مما يعكس اختلاف سلوك المنتجات خلال التخزين ويشكل أساسًا لتفسير النتائج الاستنتاجية اللاحقة. وتوضح القيم الوصفية اتجاهات أولية في اختلاف المتغيرات الفيزيائية والحسية بين نظامي التغليف وبين المنتجات، ولا تُستخدم وحدها للحكم على معنوية الفروق، بل تمثل مدخلًا وصفيًا يسبق التحليل الإحصائي الاستنتاجي في الجداول اللاحقة.

الجدول (2): الإحصاءات الوصفية لمتغيرات خصائص البسكويت تحت تأثير نوع التغليف واختلاف المنتجات

Analysis	Variable	Packaging	n	Mean ± SD	Range
Packaging effect in Abu Walad	Moisture	BOPP_HS_30	288	2.81 ± 1.50	0.37 – 5.99
		Metallized	288	1.58 ± 0.67	0.14 – 3.56
	a_w	BOPP_HS_30	288	0.314 ± 0.052	0.203 – 0.405
		Metallized	288	0.259 ± 0.033	0.171 – 0.332
	Appearance	BOPP_HS_30	288	7.13 ± 0.39	6.34 – 7.99
		Metallized	288	7.35 ± 0.38	6.52 – 8.18
	Crispness	BOPP_HS_30	288	4.34 ± 2.18	1.00 – 7.98
		Metallized	288	6.62 ± 1.04	3.65 – 8.89
	Taste	BOPP_HS_30	288	4.77 ± 1.52	1.42 – 7.40
		Metallized	288	6.42 ± 0.71	4.24 – 7.92
	Overall acceptability	BOPP_HS_30	288	4.75 ± 1.79	1.55 – 7.85
		Metallized	288	6.64 ± 0.84	4.10 – 8.40
Product differences under metallized packaging	Moisture	Abu Walad	288	1.58 ± 0.67	0.14 – 3.56
		Bourbon	288	1.58 ± 0.53	0.20 – 2.93
		Tops	288	1.75 ± 0.61	0.28 – 3.01
	a_w	Abu Walad	288	0.259 ± 0.033	0.171 – 0.332
		Bourbon	288	0.270 ± 0.016	0.224 – 0.308
		Tops	288	0.290 ± 0.021	0.228 – 0.330
	Appearance	Abu Walad	288	7.35 ± 0.38	6.52 – 8.18
		Bourbon	288	7.79 ± 0.21	7.25 – 8.22
		Tops	288	7.67 ± 0.52	6.41 – 8.92
	Crispness	Abu Walad	288	6.62 ± 1.04	3.65 – 8.89
		Bourbon	288	7.80 ± 0.39	6.42 – 8.36
		Tops	288	6.62 ± 1.03	4.18 – 8.71
	Taste	Abu Walad	288	6.42 ± 0.71	4.24 – 7.92
		Bourbon	288	7.91 ± 0.31	6.87 – 8.41
		Tops	288	8.05 ± 0.56	6.38 – 9.00
	Overall acceptability	Abu Walad	288	6.64 ± 0.84	4.10 – 8.40
		Bourbon	288	7.82 ± 0.33	6.64 – 8.38
		Tops	288	7.12 ± 0.80	5.21 – 8.70

ملاحظة: القيم تمثل المتوسط ± الانحراف المعياري. SD = Standard Deviation؛ aw = Water Activity؛ BOPP = Bi-axially Oriented Polypropylene. يشير Analysis إلى نوع المقارنة المعروضة؛ إذ تمثل Packaging effect in Abu Walad المقارنة بين BOPP و metallized packaging في منتج Abu Walad فقط، بينما تمثل Product differences

مقارنة المنتجات under metallized packaging تحت نظام التغليف الممعدن فقط. تم تجميع القيم من مواقع التخزين وأشهر الدراسة.

وعلى مستوى مقارنة المنتجات تحت التغليف الممعدن، فقد أظهرت القيم الوصفية تقاربًا في المحتوى الرطوبي بين أبو ولد وبوربون، مع ارتفاع طفيف في توبس، في حين سجل النشاط المائي اتجاهًا تصاعديًا من أبو ولد إلى بوربون ثم توبس. وعلى المستوى الحسي، ظهر تفوق نسبي لبوربون في المظهر والقرمشة، بينما سجل توبس أعلى قيمة في الطعم، وانعكس ذلك في اختلاف مستويات التقبل الكلي بين المنتجات. وتُفسر هذه القيم بوصفها اتجاهات وصفية أولية لا تكفي وحدها للحكم على معنوية الفروق، إذ عولجت دلالة الفروق بين المنتجات لاحقًا باستخدام نماذج الانحدار الخطي المختلط والمقارنات البعدية المصححة. كما تُعرض اختلافات استجابة المنتجات تحت التغليف الممعدن دون إسنادها إلى سبب بنيوي محدد لعدم توفر قياسات تركيبية أو بنيوية مباشرة. واقتصرت المقارنة مع تغليف غير الممعدن على منتج أبو ولد فقط، لأنه المنتج المتاح تحت نظامي التغليف ضمن التصميم التجريبي، لذلك لا تُعمم نتائج أثر نوع التغليف على بوربون وتوبس اللذين قُيّما تحت التغليف الممعدن فقط.

أظهر المحتوى الرطوبي انخفاضًا واضحًا عند استخدام التغليف الممعدن مقارنة بالتغليف غير الممعدن في منتج أبو ولد، حيث انخفض المتوسط من 2.81 ± 1.50 إلى 1.58 ± 0.67، بالتوازي مع انخفاض النشاط المائي من 0.314 ± 0.052 إلى 0.259 ± 0.033، وهو ما يدعم وجود ارتباط بين استخدام التغليف الممعدن وتحسن استقرار المنتج نتيجة لانخفاض المحتوى الرطوبي أثناء التخزين. يُعزى هذا الانخفاض إلى القدرة العالية للتغليف الممعدن على الحد من انتقال بخار الماء مقارنة بالتغليف البلاستيكي التقليدي بسبب انخفاض معدلات النفاذية [17]. كما تدعم الأدلة التجريبية أن هذا النوع من التغليف يحافظ على ثبات المحتوى الرطوبي أثناء التخزين مقارنة بالتغليف غير الممعدن [18]، وتتوافق هذه النتائج مع دراسة سابقة أظهرت انخفاض معدل امتصاص الرطوبة باستخدام التغليف الممعدن مقارنة بالبلاستيكي [19]، كما تم تسجيل سلوك مماثل في دراسات أخرى تحت ظروف تخزين مختلفة مما يعزز موثوقية هذا الاتجاه [20]. كذلك تشير نتائج أخرى إلى أن انخفاض انتقال الرطوبة يرتبط باستقرار النشاط المائي خلال فترة التخزين [21]، إذ إن الحد من اكتساب الماء داخل المنتج يساعد على انخفاض التغير في كمية الماء المتاح، وهو ما ينعكس على ثبات النشاط المائي، مما يدعم التفسير بأن التغليف الممعدن يحد من التغيرات المرتبطة بالماء داخل المنتج [22].

تزامن هذا التحسن في مؤشرات الرطوبة مع تحسن واضح في الخصائص الحسية، كما هو موضح في الجدول (2)، وكان التحسن أكثر وضوحًا في القرمشة والتقبل الكلي مقارنة بالمظهر. يشير هذا التزامن إلى علاقة داعمة بين ضبط انتقال الرطوبة والحفاظ على الخصائص الحسية، دون اعتباره دليلًا سببيًا منفردًا بمعزل عن عوامل أخرى غير مقاسة مثل سلامة الإغلاق، واختلافات التصنيع، وسمك المنتج، وخصائص التركيبة. ترتبط القرمشة في البسكويت

بدرجة امتصاص الرطوبة [23]، كما أن ارتفاع النشاط المائي يؤدي إلى تغير الخصائص النسيجية وفقدان البنية الميكانيكية المميزة للمنتج [24]، كما يظهر أيضًا أن الحد من زيادة النشاط المائي والصلابة يسهم في الحفاظ على القرمشة لفترة أطول [25]، وهو ما ينعكس إيجابًا على القبول الحسي العام [26]، ويتسق هذا الاتجاه مع نتائج أوضحت تفوق التغليف الممعدن في الحفاظ على الصفات الحسية، بما في ذلك القرمشة والطعم والمظهر [27]، كما دعمت دراسات أخرى استمرار هذا التفوق في متغيرات القبول الحسي المختلفة خلال التخزين [28]. يؤكد ذلك الأساس التكنولوجي المعروف بأن امتصاص الرطوبة يمثل العامل الأكثر حسمًا في فقدان قرمشة البسكويت وتراجع جودته الحسية [29].

تأثير نوع التغليف على مؤشرات الرطوبة والخصائص الحسية للبسكويت (أبو ولد)

تعرض نتائج تأثير نوع التغليف على مؤشرات الرطوبة والخصائص الحسية لمنتج أبو ولد في الجدول (3)، حيث تم تقييم الفروق بين التغليف الممعدن والتغليف غير ممعدن بعد ضبط تأثير المدينة والزمن والرطوبة النسبية.

تعتمد التقديرات المعروضة على نماذج الانحدار الخطي المختلط (LMM) لكل من المحتوى الرطوبي والنشاط المائي والقرمشة والطعم والتقبل الكلي، في حين تم تحليل متغير المظهر باستخدام نموذج الانحدار الخطي مع أخطاء معيارية متينة (OLS–HC3)، وقد اعتُمد التغليف غير الممعدن كفئة مرجعية، وتم عرض المتغيرات الأساسية فقط لتسهيل عرض النتائج وتفسيرها.

الجدول (3): نتائج نموذج تأثير نوع التغليف على مؤشرات الرطوبة والخصائص الحسية لمنتج أبو ولد

Variable	Term	Estimate	p	95% CI
Moisture	Metallized (vs BOPP)	-1.2333	<0.001	-1.5848 to -0.8819
	Month	0.2303	<0.001	0.1794 to 0.2813
	Relative Humidity	0.0012	0.958	-0.0421 to 0.0444
a_w	Metallized (vs BOPP)	-0.0549	<0.001	-0.0676 to -0.0421
	Month	0.008	<0.001	0.0061 to 0.0098
	Relative Humidity	-0.0006	0.49	-0.0021 to 0.0010
Appearance	Metallized (vs BOPP)	0.2149	<0.001	0.1874 to 0.2424
	Month	-0.101	<0.001	-0.1050 to -0.0969
	Relative Humidity	-0.0012	0.479	-0.0046 to 0.0022
Crispness	Metallized (vs BOPP)	2.2812	<0.001	1.7684 to 2.7939
	Month	-0.3358	<0.001	-0.4101 to -0.2615
	Relative Humidity	0.0021	0.947	-0.0609 to 0.0652
Taste	Metallized (vs BOPP)	1.6527	<0.001	1.2987 to 2.0068
	Month	-0.2331	<0.001	-0.2844 to -0.1818
	Relative Humidity	-0.0002	0.994	-0.0437 to 0.0434
Overall acceptability	Metallized (vs BOPP)	1.8842	<0.001	1.4716 to 2.2968
	Month	-0.2801	<0.001	-0.3399 to -0.2204
	Relative Humidity	0.0018	0.944	-0.0489 to 0.0526

ملاحظة: تمثل المعاملات فروقًا مقدّرة مقارنة بالفئة المرجعية. الفئة المرجعية لنوع التغليف هي BOPP. تشير القيم السالبة إلى انخفاض المتغير التابع مقارنة بالفئة المرجعية، بينما تشير القيم الموجبة إلى زيادته. LMM = Linear Mixed Model؛ OLS–HC3 = Ordinary Least Squares with HC3 robust standard errors. اعتُمد مستوى دلالة $p \leq 0.05$.

أظهر نوع التغليف تأثيرًا معنويًا واضحًا على المحتوى الرطوبي، حيث ارتبط التغليف الممعدن بانخفاض قدره (−1.2333) مقارنة بالتغليف غير الممعدن ($p < 0.001$)، بالتوازي مع انخفاض في النشاط المائي (−0.0549، $p < 0.001$)، مما يشير إلى أن التحسن في استقرار المنتج يرتبط بانخفاض انتقال الرطوبة أثناء التخزين. يُعزى هذا التأثير إلى انخفاض معدلات نفاذية بخار الماء في التغليف الممعدن مقارنة بالتغليف غير الممعدن، كما تؤكد الأدلة التجريبية أن هذا النوع من التغليف يرتبط بانخفاض واضح في اكتساب الرطوبة والنشاط المائي أثناء التخزين [17]، وهو ما يتوافق مع نتائج دراسات أخرى أظهرت تحسنًا مماثلًا في استقرار المنتجات الغذائية تحت التغليف الممعدن [29].

تزامن هذا الانخفاض في المتغيرات الفيزيائية مع تحسن واضح في الخصائص الحسية، حيث سجلت القرمشة زيادة كبيرة بلغت (2.2812، $p < 0.001$)، كما ارتفع الطعم (1.6527، $p < 0.001$) والتقبل الكلي (1.8842، $p < 0.001$). ويدعم هذا النمط تفسيرًا مفاده أن ضبط انتقال الرطوبة قد يسهم في الحفاظ على خصائص المنتج الحسية، مع ضرورة تفسير هذه العلاقة بوصفها علاقة ترابطية ضمن تصميم الدراسة الحالي، وليست دليلًا سببيًا مستقلًا عن العوامل التصنيعية أو البنيوية غير المقاسة. يرتبط هذا التأثير بكون فقدان القرمشة في البسكويت يتحدد بشكل مباشر بامتصاص الرطوبة [24]، كما أن تغير المحتوى الرطوبي يؤدي إلى فقدان البنية الميكانيكية المميزة للمنتج [1]، وهو ما يفسر التحسن الملحوظ في القرمشة مع انخفاض المحتوى الرطوبي.

في المقابل، كان تأثير التغليف على المظهر أقل مقارنة ببقية الصفات، رغم كونه معنويًا (0.2149، $p < 0.001$)، مما يشير إلى أن هذا المتغير أقل تأثرًا بالتغيرات المرتبطة بالرطوبة، وقد يرتبط بعوامل أخرى مثل الخصائص السطحية أو التفاعلات المرتبطة بالأكسدة والتغيرات اللونية [30].

أظهر الزمن تأثيرًا موجبًا على كل من المحتوى الرطوبي والنشاط المائي، مقابل تأثير سالب على الخصائص الحسية، مما يعكس التدهور التدريجي في خصائص المنتج خلال فترة التخزين، حيث يؤدي التعرض المستمر لظروف التخزين إلى زيادة امتصاص الرطوبة وتراجع الصفات الحسية [31]. وقد قِيست الرطوبة النسبية شهريًا في مواقع التخزين وأُدرجت في النموذج بوصفها متغيرًا بيئيًا ضابطًا. في حين لم يظهر لمتغير الرطوبة النسبية تأثير مستقل معنوي على معظم المتغيرات ضمن النموذج المستخدم، ولا يعني ذلك نفي دوره في اكتساب الرطوبة، بل يشير إلى أن أثره المستقل لم يكن واضحًا بعد الضبط للزمن والمدينة، وقد يعكس ذلك تداخل الرطوبة النسبية مع العامل الزمني أو أثر استخدام

المتوسطات الشهرية، نظرًا للطبيعة التراكمية لاكتساب الرطوبة أثناء التخزين [32].

اختلاف استجابة المنتجات تحت التغليف الممعدن

تعرض نتائج مقارنة المنتجات المختلفة تحت نظام التغليف الممعدن في الجدول (4)، حيث تم تقييم الفروق بين المنتجات بعد الضبط للمدينة والزمن والرطوبة النسبية، مع اعتماد منتج أبو ولد كفئة مرجعية.

تعتمد التقديرات المعروضة على نماذج الانحدار الخطي المختلط (LMM)، وتم عرض المتغيرات الأساسية فقط لتسهيل عرض النتائج وتفسيرها.

الجدول (4): نتائج نموذج مقارنة المنتجات تحت التغليف الممعدن

Variable	Term	Estimate	p	95% CI
Moisture	Bourbon (vs Abu Walad)	-0.0011	0.991	-0.1841 to 0.1820
	Tops (vs Abu Walad)	0.1699	0.069	-0.0131 to 0.3530
	Month	0.0272	0.014	0.0055 to 0.0488
	Relative Humidity	-0.0142	0.129	-0.0326 to 0.0041
a_w	Bourbon (vs Abu Walad)	0.0113	0.003	0.0038 to 0.0189
	Tops (vs Abu Walad)	0.0307	<0.001	0.0232 to 0.0383
	Month	0.0008	0.089	-0.0001 to 0.0017
	Relative Humidity	-0.0006	0.138	-0.0013 to 0.0002
Crispness	Bourbon (vs Abu Walad)	1.179	<0.001	0.9235 to 1.4345
	Tops (vs Abu Walad)	-0.0006	0.996	-0.2561 to 0.2549
	Month	-0.108	<0.001	-0.1382 to -0.0778
	Relative Humidity	0.0056	0.667	-0.0200 to 0.0313
Taste	Bourbon (vs Abu Walad)	1.4844	<0.001	1.3188 to 1.6501
	Tops (vs Abu Walad)	1.6295	<0.001	1.4639 to 1.7952
	Month	-0.0491	<0.001	-0.0687 to -0.0295
	Relative Humidity	-0.0007	0.938	-0.0173 to 0.0160
Overall acceptability	Bourbon (vs Abu Walad)	1.1865	<0.001	0.9847 to 1.3883
	Tops (vs Abu Walad)	0.4819	<0.001	0.2801 to 0.6837
	Month	-0.0897	<0.001	-0.1136 to -0.0658
	Relative Humidity	0.0035	0.733	-0.0167 to 0.0238

ملاحظة: تمثل المعاملات فروقًا مقدّرة مقارنة بالفئة المرجعية. الفئة المرجعية للمنتج هي Abu Walad. تشير القيم السالبة إلى انخفاض المتغير التابع مقارنة بالفئة المرجعية، بينما تشير القيم الموجبة إلى زيادته. LMM = Linear Mixed Model؛ aw = water activity. اعتُمد مستوى دلالة $p \leq 0.05$.

بالنسبة للمحتوى الرطوبي، لم تظهر فروق معنوية بين بوربون وأبو ولد (−0.0011، p = 0.991)، كما لم يكن الفرق بين توبس وأبو ولد معنويًا (0.1699، p = 0.069). يشير ذلك إلى أن نظام التغليف الممعدن أدى إلى انخفاض الفروقات بين المنتجات من حيث اكتساب الرطوبة الكلية، وهو ما يتوافق مع ما ورد

حول دور مواد التغليف منخفضة النفاذية في الحد من انتقال الرطوبة خلال التخزين [21]. كما أظهرت نتائج تجريبية أن استخدام هذا النوع من التغليف يسهم في انخفاض التغيرات في المحتوى الرطوبي أثناء التخزين [29]. كذلك تم تسجيل اتجاه مماثل لانخفاض التباين في امتصاص الرطوبة بين المنتجات تحت نفس نظام التغليف [19].

في المقابل، أظهر النشاط المائي (aw) فروقًا معنوية، حيث سجل كل من بوربون (0.0113، $p = 0.003$) وتوبس (0.0307، $p < 0.001$) قيمًا أعلى مقارنة بأبو ولد، رغم عدم ظهور فروق معنوية واضحة في المحتوى الرطوبي الكلي بين المنتجات. يشير ذلك إلى أن كمية الماء الكلية لا تعكس بالضرورة درجة إتاحة الماء داخل المنتج؛ إذ يمكن أن تتقارب المنتجات في المحتوى الرطوبي بينما تختلف في النشاط المائي تبعًا لطريقة ارتباط الماء بالمكونات الصلبة. وقد تسهم اختلافات التركيبة العامة، مثل مستوى السكريات، والدهون، ووجود الكاكاو، ونمط توزيع المكونات داخل المصفوفة الجافة، في تغيير قدرة المنتج على ربط الماء أو إتاحته دون أن يظهر ذلك بالضرورة في صورة فرق واضح في الرطوبة الكلية [33،34]، وبناءً على ذلك، فإن ارتفاع aw في توبس وبوربون مقارنة بأبو ولد يُفسر بوصفه اختلافًا في حالة الماء داخل المنتج لا مجرد اختلاف في كمية الماء، مع بقاء هذا التفسير احتماليًا لأن الدراسة لم تتضمن قياسات مباشرة للتركيب الكيميائي أو البنية المجهرية أو المسامية.

أما الخصائص الحسية، فقد أظهرت نمطًا لا يقتصر على اختلاف المتوسطات، بل يعكس اختلافًا محتملًا في طبيعة استجابة كل منتج للتخزين. فقد تفوق بوربون في القرمشة مقارنة بأبو ولد وتوبس، بينما سجل منتج توبس أعلى تقدير حسي للطعم، وهو ما يشير إلى أن مؤشرات القبول الحسي لا تتحرك دائمًا في اتجاه واحد. ويمكن تفسير تفوق بوربون في القرمشة احتماليًا بخصائص مرتبطة ببنية المنتج الجافة وصلابة العجين وتوزيع الدهون والسكريات داخل المصفوفة، وهي عوامل قد تؤثر في مقاومة فقدان القوام المقرمش أثناء التخزين. في المقابل، قد يرتبط ارتفاع التقدير الحسي للطعم في منتج توبس بطبيعة النكهة أو الحشوة أو المكونات السكرية/العطرية، وهي عوامل قد ترفع إدراك الطعم حتى عندما لا يكون المنتج الأفضل في القرمشة، لذلك تُفسر هذه الفروق بوصفها اختلافات في الاستجابة الحسية العامة تحت نظام التغليف نفسه، لا دليلًا مباشرًا على سبب تركيبي أو بنيوي محدد، نظرًا لعدم قياس التركيب الكيميائي أو الكثافة أو المسامية أو البنية المجهرية للمنتجات [27،28،30]. من ناحية أخرى، أظهر الزمن تأثيرًا موجبًا على المتغيرات الفيزيائية وسالبًا على الخصائص الحسية، مما يعكس التدهور التدريجي في خصائص المنتجات خلال فترة التخزين.

تشير هذه النتائج إلى أن المنتجات اختلفت في النشاط المائي والخصائص الحسية رغم تخزينها تحت نظام التغليف نفسه. ويمكن مناقشة هذه الفروق بحذر في ضوء اختلاف فئة العجين وبعض الخصائص التركيبية العامة، مثل وجود الكاكاو أو اختلاف طبيعة المنتج. وتدعم الأدبيات أن انتقال الرطوبة وحالة الماء داخل المنتجات الجافة يرتبطان بخصائص المنتج وبالعلاقة

بين الماء والبنية الميكانيكية للغذاء [24،29]. وعليه، فإن الجمع بين المحتوى الرطوبي والنشاط المائي والخصائص الحسية يوفر تفسيرًا أكثر دقة من الاعتماد على مؤشر واحد. فالمحتوى الرطوبي يصف كمية الماء الكلية، بينما يعكس النشاط المائي درجة إتاحة الماء وتأثره بالمكونات القادرة على الربط أو الاحتجاز، لذلك فإن غياب فروق معنوية واضحة في الرطوبة الكلية بين المنتجات لا يتعارض مع ظهور فروق في aw أو في الصفات الحسية، لأن هذه المؤشرات تقيس جوانب مختلفة من علاقة المنتج بالماء. كما أن اختلاف القرمشة والطعم والتقبل الكلي بين المنتجات يشير إلى أن الخصائص الحسية أثناء التخزين تتأثر بتفاعل معقد بين حالة الماء، وطبيعة المنتج، وتركيبته العامة، وليس بمجرد مقدار الرطوبة الكلية فقط.

تحليل التفاعلات الزمنية بين التغليف والمنتج وموقع التخزين

أُجري تحليل للتفاعلات الأساسية المرتبطة بزمن التخزين، بهدف اختبار ما إذا كان مسار تغير خصائص البسكويت عبر الزمن يختلف باختلاف نوع التغليف في نموذج أبو ولد، أو باختلاف نوع المنتج في نموذج المنتجات تحت التغليف المعدن، وكذلك باختلاف موقع التخزين. يوضح الجدول (5) ملخصًا للتفاعلات الرئيسة ذات الصلة بأهداف الدراسة وحدود المقارنات المعتمدة، بينما تُعرض معاملات مختارة للتفاعلات المعنوية وقيم الدلالة الإحصائية المرتبطة بها في الجدول التكميلي (S1).

جدول 5 ملخص التفاعلات الإحصائية الأساسية المرتبطة بزمن التخزين

Model	Tested interaction	Variables with significant interaction	Statistical significance
Abu Walad: Metallized vs BOPP	Packaging type × Month	Moisture, aw, Crispness, Taste, Overall acceptability	< 0.001
Abu Walad: Metallized vs BOPP	Packaging type × Storage location	Moisture, aw, Crispness, Taste, Overall acceptability	< 0.001–0.002
Abu Walad: Metallized vs BOPP	Storage location × Month	Moisture, aw, Crispness, Taste, Overall acceptability	< 0.001–0.009
Products under metallized packaging	Product type × Month	Appearance, Crispness, Taste, Overall acceptability	< 0.001–0.020
Products under metallized packaging	Product type × Storage location	aw, Crispness, Taste, Overall acceptability	< 0.001–0.038
Products under metallized packaging	Storage location × Month	Moisture, aw, Crispness, Taste, Overall acceptability	< 0.001–0.045

ملاحظة: يعرض الجدول التفاعلات الأساسية المرتبطة بزمن التخزين ضمن نماذج تأثير نوع التغليف ومقارنة المنتجات تحت التغليف المعدن. وتمثل الأعمدة المتغيرات التي ظهر فيها تأثير التفاعل معنويًا إحصائيًا ضمن النماذج المستخدمة. وتُعرض معاملات مختارة للتفاعلات المعنوية الأكثر ارتباطًا

بتفسير النتائج في الجدول التكميلي (S1). ويرمز aw إلى النشاط المائي (Water Activity).

أظهرت نتائج تحليل التفاعلات أن تفاعل نوع التغليف × الشهر في نموذج أبو ولد كان معنويًا في المحتوى الرطوبي والنشاط المائي والقرمشة والطعم والتقبل الكلي، بينما لم يظهر في المظهر. كما ظهر تفاعل نوع التغليف × موقع التخزين معنويًا في تعز للمتغيرات نفسها، في حين ظهر تفاعل موقع التخزين × الشهر معنويًا في الحديدة للمحتوى الرطوبي والنشاط المائي والقرمشة والطعم والتقبل الكلي.

أما في نموذج المنتجات تحت التغليف الممعدن، فقد ظهر تفاعل نوع المنتج × الشهر معنويًا في منتج توبس للمظهر والقرمشة والطعم والتقبل الكلي، بينما ظهر في بوربون للمظهر فقط. كما ظهر تفاعل نوع المنتج × موقع التخزين خصوصًا في تعز للنشاط المائي وعدد من الخصائص الحسية، في حين أظهر تفاعل موقع التخزين × الشهر دلالة في الحديدة لعدة متغيرات، وفي تعز للنشاط المائي والطعم والتقبل الكلي.

المقارنات البعدية (اختبار Tukey)

تعرض نتائج المقارنات الثنائية المصححة باستخدام اختبار Tukey المعدل (Tukey–adjusted) في الجدول (6)، حيث تم تقييم الفروق بين مستويات المتغيرات المدروسة لكل من تأثير نوع التغليف في منتج أبو ولد، وكذلك الفروق بين المنتجات المختلفة تحت نظام التغليف الممعدن، وذلك بعد الضبط لمتغيرات المدينة والزمن والرطوبة النسبية، مع عرض المقارنات الأساسية فقط لتسهيل عرض النتائج وتفسيرها.

الجدول (6): المقارنات البعدية لتأثير التغليف والفروق بين المنتجات (اختبار Tukey)

Analysis	Variable	Comparison	Mean Difference	p	95% CI
Packaging effect in Abu Walad	Moisture	Metallized vs BOPP	-1.2333	<0.001	-1.4239 to -1.0427
	a_w	Metallized vs BOPP	-0.0549	<0.001	-0.0620 to -0.0478
	Crispness	Metallized vs BOPP	2.2812	<0.001	2.0906 to 2.4718
	Taste	Metallized vs BOPP	1.6527	<0.001	1.4621 to 1.8433
	Overall acceptability	Metallized vs BOPP	1.8842	<0.001	1.6936 to 2.0748
Product differences under metallized packaging	Moisture	Tops vs Abu Walad	0.1699	0.069	-0.0131 to 0.3530
		Bourbon vs Abu Walad	-0.0011	0.991	-0.1841 to 0.1820
	a_w	Tops vs Abu Walad	0.0307	<0.001	0.0232 to 0.0383
		Bourbon vs Abu Walad	0.0113	0.003	0.0038 to 0.0189
	Crispness	Tops vs Abu Walad	-0.0006	0.996	-0.2561 to 0.2549
		Bourbon vs Abu Walad	1.179	<0.001	0.9235 to 1.4345
	Taste	Tops vs Abu Walad	1.6295	<0.001	1.4639 to 1.7952
		Bourbon vs Abu Walad	1.4844	<0.001	1.3188 to 1.6501
	Overall acceptability	Tops vs Abu Walad	0.4819	<0.001	0.2801 to 0.6837
		Bourbon vs Abu Walad	1.1865	<0.001	0.9847 to 1.3883

ملاحظة: تمثل Mean Difference الفرق المقدر بين المجموعتين في كل مقارنة. يشير Analysis إلى نوع المقارنة المعروضة؛ إذ تمثل Packaging effect in Abu Walad المقارنة بين التغليف الممعدن والغير ممعدن في منتج Abu Walad فقط، بينما تمثل Product differences under metallized packaging الفروق بين المنتجات تحت التغليف الممعدن فقط، مع اعتماد Abu Walad مرجعًا في المقارنات المعروضة. 95% CI = فاصل الثقة 95%. استُخدم تصحيح Tukey للتحكم في الخطأ الناتج عن تعدد المقارنات، واعتُمد مستوى دلالة $p \leq 0.05$.

أظهرت نتائج المقارنات البعدية أن استخدام التغليف الممعدن ارتبط بانخفاض معنوي في كل من المحتوى الرطوبي (−1.2333، $p < 0.001$) والنشاط المائي (−0.0549، $p < 0.001$) مقارنة بتغليف BOPP، وهو ما يدعم كفاءة هذا النوع من التغليف في الحد من انتقال الرطوبة أثناء التخزين، ويتوافق مع نتائج أظهرت انخفاضًا مماثلًا في المحتوى الرطوبي عند استخدام مواد تغليف منخفضة النفاذية [17]. كما تدعم دراسات أخرى هذا الاتجاه من خلال تسجيل انخفاض النشاط المائي تحت ظروف تغليف محسنة [18]. كذلك تم توثيق تحسن استقرار المنتجات الغذائية نتيجة استخدام مواد تغليف ذات خصائص عزل أفضل [20]. كما تشير نتائج أخرى إلى دور التغليف في انخفاض التغيرات المرتبطة بالماء أثناء التخزين [22].

في المقابل، ترافق هذا الانخفاض مع زيادات معنوية في الخصائص الحسية، حيث تحسنت القرمشة (2.2812، $p < 0.001$) والطعم (1.6527، $p < 0.001$) والتقبل الكلي (1.8842، $p < 0.001$). ويدعم ذلك وجود علاقة وثيقة بين مؤشرات الرطوبة والخصائص الحسية، إلا أن هذه العلاقة ينبغي تفسيرها بحذر بوصفها ارتباطًا مدعومًا بالنمط الزمني والنتائج الإحصائية، لا دليلًا سببيًا مباشرًا بمعزل عن عوامل أخرى غير مقاسة.

أما فيما يتعلق بمقارنة المنتجات تحت التغليف الممعدن، فقد أكدت نتائج المقارنات البعدية عدم وجود فروق معنوية في المحتوى الرطوبي بين المنتجات، مما يشير إلى أن تأثير التغليف الممعدن كان كافيًا للحد من الفروقات المرتبطة باكتساب الرطوبة. في المقابل، هناك فروق معنوية في النشاط المائي، حيث سجل كل من توبس وبوربون قيمًا أعلى مقارنة بأبو ولد، وهو ما يعكس اختلافًا في التوازن الرطوبي الداخلي بين المنتجات، حيث يعبر النشاط المائي عن توزيع الماء ودرجة ارتباطه بالمكونات داخل المنتج [33]. على مستوى الخصائص الحسية، أظهرت النتائج تفوقًا واضحًا لمنتج بوربون في القرمشة، في حين لم يظهر فرق معنوي بين توبس وأبو ولد في هذا المتغير. أما الطعم والتقبل الكلي، فقد كانا أعلى بشكل معنوي في كل من توبس وبوربون مقارنة بأبو ولد. تشير هذه النتائج إلى اختلاف الاستجابة الحسية بين المنتجات تحت نظام التغليف الممعدن. وبما أن أداء التغليف يتأثر عمومًا بكفاءة الإغلاق وخصائص

النفاذية [35،21]، فإن تفسير هذه الفروق يجب أن يبقى ضمن حدود البيانات المقاسة، دون إسنادها إلى اختلاف بنيوي محدد بين المنتجات لعدم توفر قياسات مباشرة للتركيب أو المسامية أو الكثافة أو البنية المجهرية. تشير هذه النتائج إلى أن المقارنات البعدية تدعم ما أظهرته النماذج الإحصائية، إذ ظهر تأثير التغليف بشكل واضح على خفض المحتوى الرطوبي وتحسين الخصائص الحسية في منتج المقارنة. أما الفروق بين المنتجات المخزنة تحت التغليف الممعدن، فتشير إلى اختلاف استجابتها في النشاط المائي والخصائص الحسية، ويمكن تفسيرها بحذر في ضوء خصائص التركيبة العامة، دون اعتبارها دليلًا مباشرًا على أثر البنية الداخلية أو التركيب البنيوي.

أحجام التأثير (Hedges' g)

تعرض أحجام التأثير في الجدول (7) باستخدام معامل Hedges g لتقييم الأهمية العملية للفروق المرتبطة بتأثير نوع التغليف في منتج أبو ولد، وكذلك الفروق بين المنتجات المختلفة تحت التغليف الممعدن، بوصفها مؤشرات وصفية تكميلية لحجم الفروق بين المجموعات، وليست معاملات معدلة من نموذج LMM.

الجدول (7): أحجام التأثير (Hedges' g) لتأثير التغليف والفروق بين المنتجات

Analysis	Variable	Comparison	Hedges' g	95% CI	Higher Group
Packaging effect in Abu Walad	Moisture	Metallized vs BOPP	1.0577	[0.8833, 1.2321]	BOPP
	a_w	Metallized vs BOPP	1.2646	[1.0857, 1.4436]	BOPP
	Appearance	Metallized vs BOPP	-0.5546	[-0.7210, -0.3881]	Metallized
	Crispness	Metallized vs BOPP	-1.3334	[-1.5140, -1.1527]	Metallized
	Taste	Metallized vs BOPP	-1.3923	[-1.5744, -1.2102]	Metallized
	Overall acceptability	Metallized vs BOPP	-1.3423	[-1.5231, -1.1614]	Metallized
Product differences under metallized packaging	Moisture	Abu Walad vs Tops	-0.264	[-0.4280, -0.09995]	Tops
		Abu Walad vs Bourbon	0.0017	[-0.1616, 0.1651]	None (equivalent)
		Tops vs Bourbon	0.3	[0.1357, 0.4642]	Tops
	a_w	Abu Walad vs Tops	-1.1088	[-1.2843, -0.9334]	Tops
		Abu Walad vs Bourbon	-0.4361	[-0.6014, -0.2708]	Bourbon
		Tops vs Bourbon	1.041	[0.8669, 1.2151]	Tops
	Appearance	Abu Walad vs Tops	-0.7007	[-0.8689, -0.5324]	Tops
		Abu Walad vs Bourbon	-1.4392	[-1.6225, -1.2558]	Bourbon
		Tops vs Bourbon	-0.3075	[-0.4718, -0.1432]	Bourbon
	Crispness	Abu Walad vs Tops	0.0006	[-0.1628, 0.1639]	None (equivalent)
		Abu Walad vs Bourbon	-1.5025	[-1.6876, -1.3175]	Bourbon
		Tops vs Bourbon	-1.5103	[-1.6956, -1.3251]	Bourbon
	Taste	Abu Walad vs Tops	-2.5415	[-2.7613, -2.3217]	Tops
		Abu Walad vs Bourbon	-2.6972	[-2.9230, -2.4713]	Bourbon
		Tops vs Bourbon	0.3189	[0.1545, 0.4833]	Tops
	Overall acceptability	Abu Walad vs Tops	-0.5866	[-0.7534, -0.4198]	Tops
		Abu Walad vs Bourbon	-1.8486	[-2.0439, -1.6534]	Bourbon
		Tops vs Bourbon	-1.1535	[-1.3300, -0.9771]	Bourbon

وتُفسر قيم Hedges’ g في ضوء اتجاه الفرق وعمود Higher Group، إذ يوضح هذا العمود المجموعة ذات القيمة الأعلى في كل مقارنة، بينما تُستخدم قيمة g لتقدير حجم الفرق بوصفه مؤشرًا وصفيًا تكميليًا بجانب نتائج نماذج LMM والمقارنات البعدية المصححة.

ملاحظة: تمثل قيم Hedges’ g حجم الفرق بين المجموعات بوصفه مؤشرًا وصفيًا تكميليًا للأهمية العملية. يشير Analysis إلى نوع المقارنة المعروضة؛ إذ تمثل Packaging effect in Abu Walad مقارنة نظامي التغليف المعدن وغير المعدن في منتج Abu Walad فقط، بينما تمثل Product differences under metallized packaging مقارنة المنتجات تحت التغليف المعدن فقط. يوضح عمود Higher Group المجموعة ذات القيمة الأعلى في كل مقارنة. 95% CI = فاصل الثقة 95%. لا تُفسر قيم Hedges’ g بوصفها معاملات نموذجية معدلة للبنية الزمنية أو التجميعية، بل كمؤشرات مساندة بجانب نتائج LMM والمقارنات البعدية.

أظهرت أحجام التأثير أن استخدام التغليف المعدن ارتبط بفارق كبير في المحتوى الرطوبي لصالح التغليف غير المعدن (Hedges' g = 1.0577؛ 95% CI: 0.8833–1.2321)، مما يشير إلى أن التغليف المعدن قلل من اكتساب الرطوبة الكلية بشكل واضح من الناحية العملية. بالمقابل، كان حجم التأثير على النشاط المائي أكبر (g = 1.2646؛ 95% CI: 1.0857–1.4436)، مما يعكس أن تأثير التغليف لم يقتصر على كمية الرطوبة بل امتد إلى حالة الماء داخل المنتج.

وعلى مستوى الخصائص الحسية، سُجلت تأثيرات عملية كبيرة جدًا لصالح التغليف المعدن، حيث بلغت القرمشة (g = −1.3334؛ 95% CI: −1.5140 إلى −1.1527) والطعم (g = −1.3923؛ 95% CI: −1.5744 إلى −1.2102) والتقبل الكلي (g = −1.3423؛ 95% CI: −1.5231 إلى −1.1614)، وتشير الإشارة السالبة إلى تفوق التغليف المعدن على التغليف غير المعدن. وهذا يدل على أن تأثير التغليف يمتد بشكل واضح إلى تحسين خصائص المنتج الحسية وليس فقط خصائصه الفيزيائية [26].

فيما يتعلق بمقارنة المنتجات تحت التغليف المعدن، فقد أظهرت أحجام التأثير عدم وجود فروق ذات أهمية عملية في المحتوى الرطوبي بين أبو ولد وبوربون (g = 0.0017؛ CI يحتوي على الصفر)، ووجود فروق صغيرة بين أبو ولد وتوبس (g = −0.2640؛ 95% CI: −0.4280 إلى −0.09995)، مما يشير إلى أن نظام التغليف المعدن ساهم في انخفاض تباين المحتوى الرطوبي بين المنتجات، مع بقاء تفسير الفروق الأخرى، خصوصًا النشاط المائي والخصائص الحسية، مرتبطًا باستجابة كل منتج ضمن حدود البيانات المتاحة [19].

في المقابل، ظهرت فروق متوسطة إلى كبيرة في النشاط المائي، حيث تفوق توبس على أبو ولد

(g = −1.1088) وتفوق بوربون على أبو ولد

(g = −0.4361)، مما يعكس اختلاف التوازن الرطوبي الداخلي بين المنتجات [29].

على مستوى الخصائص الحسية، أظهر منتج بوربون تفوقًا كبيرًا في القرمشة مقارنة بأبو ولد (g = −1.5025؛ 95% CI: −1.6876 إلى −1.3175)، بينما لم يظهر فرق يذكر بين توبس وأبو ولد (g = 0.0006). أما الطعم، فقد سجل كل من توبس (g = −2.5415) وبوربون (g = −2.6972) تأثيرات كبيرة جدًا مقارنة بأبو ولد، وهو ما انعكس في التقبل الكلي الذي كان أعلى أيضًا لكلا المنتجين (توبس: g = −0.5866، بوربون: g = −1.8486).

تشير هذه النتائج إلى أن تحليل أحجام التأثير يعزز نتائج النماذج الإحصائية، حيث يوضح أن تأثير التغليف الممعدن في منتج المقارنة لا يقتصر على المعنوية الإحصائية، بل يحمل أهمية تطبيقية في تحسين الاستقرار المرتبط بالرطوبة والحفاظ على الخصائص الحسية [26]. كما أن انخفاض الفروق في المحتوى الرطوبي بين المنتجات تحت نظام التغليف نفسه يتسق مع دور مواد التغليف منخفضة النفاذية في الحد من انتقال الرطوبة أثناء التخزين [19]. أما الفروق في النشاط المائي والخصائص الحسية بين المنتجات، فتُعرض بوصفها اختلافات في الاستجابة تحت التغليف الممعدن، ولا تُعد دليلًا مباشرًا على أثر خصائص بنيوية محددة لعدم قياسها ضمن هذه الدراسة.

5. الاستنتاجات والتوصيات

تُظهر نتائج الدراسة أن استخدام التغليف الممعدن ارتبط، في منتج المقارنة، بانخفاض معنوي في المحتوى الرطوبي والنشاط المائي مقارنة بالتغليف غير الممعدن، مما يدعم كفاءته في الحد من انتقال بخار الماء في هذا المنتج ضمن ظروف التخزين المدروسة. وقد ترافق هذا الانخفاض مع تحسن واضح في الخصائص الحسية، خاصة القرمشة والتقبل الكلي. كما تشير نتائج تحليل أحجام التأثير إلى أن أثر التغليف الممعدن في منتج المقارنة لا يقتصر على الدلالة الإحصائية، بل يحمل أهمية تطبيقية في تحسين الاستقرار المرتبط بالرطوبة والحفاظ على الخصائص الحسية. كما أظهرت المقارنات بين المنتجات المخزنة تحت التغليف الممعدن وجود فروق في النشاط المائي والخصائص الحسية رغم تقارب المحتوى الرطوبي، وقد ترتبط هذه الفروق باختلاف خصائص المنتجات وتركيباتها العامة، إلا أن تأكيد الآليات التركيبية أو البنيوية يتطلب قياسات مباشرة إضافية.

كما أكد التحليل أن الزمن يمثل العامل الأكثر تأثيرًا في تطور التغيرات الفيزيائية والحسية، حيث ارتبط بزيادة تدريجية في المحتوى الرطوبي والنشاط المائي قابلها تدهور في الخصائص الحسية، في حين لم يظهر للرطوبة النسبية تأثير مستقل معنوي ضمن النموذج المستخدم، مما يشير إلى أن تفسير أثرها

ينبغي أن يتم في سياقه الزمني التراكمي. بناءً على ذلك، تدعم النتائج النظر في اختبار التغليف الممعدن على منتجات مشابهة للمنتج محل المقارنة التوسع في اعتماده تطبيقيًا، مع ضرورة مواءمة اختيار نظام التغليف مع خصائص المنتج المقاسة أو الموصوفة. كما توصي الدراسة باعتماد نماذج تحليل طولي لفصل تأثير الزمن عن العوامل البيئية، ودمج قياسات النشاط المائي مع المحتوى الرطوبي عند تقييم الاستقرار، وتوسيع الدراسات المستقبلية لمقارنة مواد تغليف مختلفة وربط خصائصها الفيزيائية بالأداء الحسي للمنتج.

6. قائمة المراجع

[1] D. Manley, *Manley's Technology of Biscuits, Crackers and Cookies*, 4th ed., Woodhead Publishing, Cambridge, 2011.

[2] G. L. Robertson, *Food Packaging: Principles and Practice*, 3rd ed., CRC Press, Boca Raton, 2012.

[3] K. Galić, D. Ćurić, and D. Gabrić, "Shelf life of packaged bakery goods—A review," Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 49, 405–426 (2009).

[4] S. Romani, S. Tappi, F. Balestra, M. T. Rodriguez-Estrada, V. Siracusa, P. Rocculi, and M. Dalla Rosa, "Effect of different new packaging materials on biscuit quality during accelerated storage," Journal of the Science of Food and Agriculture, 95, 1736–1746 (2015).

[5] P. Siracusa, "Food packaging permeability behaviour: A review," Int. J. Polym. Sci. 2012, 302029 (2012).

[6] M. Baele, A. Vermeulen, D. Adons, R. Peeters, F. Devlieghere, and P. Ragaert, "Selecting packaging materials for dry foods based on performance," Packag. Technol. Sci. 34, 303–318 (2021).

[7] Z. Chu, L. Lu, and J. Wang, "Modeling water transfer in multidomain food packed in permeable packaging," Packag. Technol. Sci. 26, 11–22 (2013).

[8] S. Romani, P. Rocculi, S. Tappi, and M. Dalla Rosa, "Moisture adsorption behaviour of biscuit during storage investigated by dynamic dewpoint analysis," Food Chem. 195, 97–103 (2016).

[9] A. B. Verde, I. D. Alvim, V. Luccas, L. Marangoni Júnior, and R. M. V. Alves, "The influence of formulation and packaging material on the rheological properties of milk chocolate," *Appl. Food Res.* 2, 100199 (2022).

[10] D. S. Lee and G. L. Robertson, "Shelf-life estimation of packaged dried foods as affected by choice of moisture sorption isotherm models," *J. Food Process. Preserv.* 46, e16335 (2022).

[11] F. Balestra, V. Verardo, S. Tappi, M. Fiorenza Caboni, and M. Dalla Rosa, "Chemical and physical changes during

storage of differently packed biscuits formulated with sunflower oil," Food Chem. 298, 125–134 (2019).

[12] S. Farris, L. Introzzi, P. Biagioni, T. Holz, and A. Piergiovanni, "Barrier properties of polymer films for food packaging," Trends Food Sci. Technol. 33, 92–101 (2013).

[13] J. A. Torres and S. Velazquez, "High barrier packaging technologies for food applications," Packag. Technol. Sci. 18, 273–283 (2005).

[14] AOAC International, *Official Methods of Analysis*, 21st ed., AOAC International, Gaithersburg, 2019.

[15] B. T. West, K. B. Welch, and A. T. Gałecki, Linear Mixed Models: A Practical Guide Using Statistical Software, 3rd ed., Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, 2022.

[16] Douziech, M., Benítez-López, A., Ernstoff, A., Askham, C., Hendriks, A. J., King, H., & Huijbregts, M. A. (2020). A regression-based model to predict chemical migration from packaging to food. Journal of exposure science & environmental epidemiology, 30(3), 469-477.

[17] Robertson GL. Packaging materials for biscuits and their influence on shelf life. In: Manley D, ed. Manley's Technology of Biscuits, Crackers and Cookies. 4th ed. Woodhead Publishing; 2011:247–267.

[18] Hiregoudar S, Mamatha HS. Effect of storage on quality parameters of foxtail millet biscuit with different packaging materials. Biological Forum. 2022;14(3):1419–1423.

[19] Jan R, Saxena DC, Singh S. Effect of storage conditions and packaging materials on the quality attributes of gluten-free cookies. Food Measure. 2017. doi:10.1007/s11694-017-9484-7

[20] Cevoli C, Evangelisti A, Gradari P, Fabbri A. Storage of wafer cookies: Assessment by destructive techniques and non-destructive methods. J Food Eng. 2023;336:1–12.

[21] Varghese C, Srivastav PP, Roopesh MS. Impact of packaging materials and storage conditions on shelf life and quality of cookies. Future Foods. 2022;6:100154.

[22] Surekha N, Naik RS, Mythri S, Devi R. Barnyard millet cookies: development and shelf life evaluation. IOSR J Environ Sci Toxicol Food Technol. 2013;7(3):1–10.

[23] Balestra F, Verardo V, Tappi S, Caboni MF, Dalla Rosa M, Romani S. Chemical and physical changes during storage of differently packed biscuits formulated with sunflower oil. J Food Sci Technol. 2019;56(10):4714–4721.

[24] Cevoli C, Evangelisti A, Gradari P, Fabbri A. Storage of wafer cookies: Assessment by destructive techniques and non-destructive spectral detection methods. J Food Eng. 2023;336:111213.

[25] Sharma S, Riar CS. Effect of storage period and packaging materials on textural, phenolic and antioxidant properties of

products during storage. Food Packag Shelf Life. 2019;19:1–7.

[31] Bhise S, Patel D, Kamaliya KB, Pandey H. Effect of storage conditions on quality and shelf life of multigrain biscuits. J Appl Hortic. 2024;26(2)

[32] Sharma P, Garg S. Influence of storage conditions on physicochemical and sensory properties of bakery products. J Food Sci Technol. 2023;60(5)

[33] Manley D. Water activity and its relationship with texture and shelf life of biscuits. In: Manley's Technology of Biscuits, Crackers and Cookies. 4th ed. Woodhead Publishing; 2011.

[34] Romani S, Tappi S, Balestra F, et al. Effect of different packaging materials on biscuit quality and water dynamics during storage. J Sci Food Agric. 2014;94(8):1736–1746.

[35] Manley D. Packaging materials and seal integrity in biscuit shelf life. In: Manley's Technology of Biscuits, Crackers and Cookies. 4th ed. Woodhead Publishing; 2011.

cookies. Ann Food Sci Technol. 2020;21(1):74–85.

[26] Bhise S, Patel D, Kamaliya KB, Pandey H. Quality and shelf-life evaluation of multigrain gluten-free biscuits developed from composite flour blends. Plant Arch. 2024;24(2):2493–2502.

[27] Sahni P, Shere DM. Effect of different packaging materials on sensory attributes of fibre-rich cookies during storage. Int J Pure Appl Biosci. 2017;5(6):265–272.

[28] Kulthe AA, Thorat SS, Khapre AP. Effects of different packaging materials on the sensory characteristics of β-carotene enriched pearl millet cookies during storage. Pharma Innov J. 2018;7(4):914–918.

[29] Singh VK, Verma S, Chaudhary V, Shahi NC. Impact of packaging materials and storage conditions on the shelf life and quality of biscuits. Int J Food Sci Nutr. 2025;10(2):9–11.

[30] Duta DE, Culetu A. Evaluation of the effects of packaging on quality changes of bakery