تحليل المكونات الرئيسية (PCA) والتحليل العنقودي للخصائص الفيزيوكيميائية للعسل تطبيق على عينات من العسل الليبي

حسن محمد أرحومة
قسم الإحصاء - كلية العلوم - جامعة طرابلس

المستخلص

يهدف هذا البحث إلى تطبيق أسلوبين من الأساليب الإحصائية الحديثة في الإحصاء التطبيقي، لدراسة التصنيف الزهري والجغرافي لعسل النحل الليبي، "تحليل المكونات الرئيسي *(PCA)* والتحليل العنقودي" لاستكشاف البنية الكامنة للخصائص الفيزيوكيميائية لعينات من العسل الليبي. اعتمدت الدراسة على تحليل 28 عينة تم جمعها من مناطق متعددة في الغرب الليبي، وتضم العينات ستة أنواع رئيسية من العسل الطبيعي: الزعتر، الربيع، السدر، الأثل، الحرمل، والجرجير؛ حيث تم قياس عشرة مؤشرات فيزيوكيميائية للعينات، شملت تركيزات العناصر الثقيلة: (الرصاص، الزنك، الكوبالت، النحاس، الحديد)، والخصائص الفيزيوكيميائية الأخرى: (السكريات المختزلة، الحموضة الحرة، الرماد الكلي، الموصلية الكهربائية، والامتصاصية). أظهرت نتائج تحليل المكونات الرئيسية *(PCA)* أن المكونات الثلاثة الأولى فسرة 68.4% من التباين الكلي للبيانات، المكون الرئيسي الأول *(PC1)* فسر ما نسبته 28.6% من التباين، وارتبط بشكل أساسي بمتغيرات المعادن الثقيلة والحموضة، بينما فسر المكون الرئيسي الثاني *(PC2)* ما نسبته 25.0% من التباين، وارتبط بالسكريات المختزلة والتوصيل الكهربائي، كشف التحليل العنقودي الهرمي أن العينات يمكن تصنيفها إلى ثلاث مجموعات رئيسية:

- المجموعة الأولى: ضمت عينات من العسل الربيعي والجرجير والأثل، واتسمت بانخفاض محتوى الرماد وحموضة متوسطة.
- المجموعة الثانية: ضمت عينة الزعتر حصراً، واتسمت بارتفاع ملحوظ في الحموضة والرماد.
- المجموعة الثالثة: ضمت عينات السدر والحرمل، واتسمت بارتفاع السكريات المختزلة وباقي الخصائص متوازنة.

تؤكد النتائج قدرة التقنيات الإحصائية متعددة المتغيرات على تمييز وتصنيف عينات العسل وفقاً لمصدرها النباتي والجغرافي، وتقدم إطاراً منهجياً يمكن الاستفادة منه في تطبيقات مراقبة الجودة وتحديد المنشأ الجغرافي للعسل، كما تسهم هذه الدراسة في إثراء قاعدة المعرفة حول الخصائص الفيزيوكيميائية للعسل الليبي، وتفتح آفاقاً لدراسات مستقبلية موسعة تشمل تحليلات أكثر شمولاً لعوامل بيئية ومناخية إضافية.

الكلمات الدالة: تحليل المكونات الرئيسية، التحليل العنقودي، العسل الليبي، الخصائص الفيزيوكيميائية، الإحصاء متعدد المتغيرات، مر اقبة الجودة.

للاتصال: أ. حسن محمد أرحومة.
هاتف: 8156 403 91 218 +
قسم الإحصاء – كلية العلوم – جامعة طر ابلس
البريد الالكتروني: h.rhoma@uot.edu.ly
استلمت بتاريخ: 28 / 06 / 2026
أجيزت بتاريخ: 06 / 08 / 2026

المقدمة

العسل مادة معقدة ينتجها النحل من مواد نباتية كالرحيق والندوة العسلية، ويُعرف العسل بأنه منتج حلو طبيعي ينتجه نحل العسل من رحيق الأزهار ومن إفرازات الحشرات الماصة للعصارة الموجودة على الأجزاء الحية من النباتات (وفق للملحق الأول من توجيه المجلس الأوروبي 2001/110). يجمع النحل هذه المواد ويخلطها مع إنزيمات محددة ويحولها ويجففها ويخزنها ويتركها لتنضج في أقراص العسل داخل خلاياه، تتأثر الخصائص الكيميائية الفيزيائية للعسل مثل محتواه من السكريات والأحماض والمعادن بعدة عوامل تشمل: نوع النبات، والظروف المناخية، والممارسات الزراعية، وطرق التخزين والتجهيز، ويمكن تصنيف العسل بناءً على أصله الجغرافي أو النباتي وفقًا للتوجيه 2001/110/EC. (Inaudi P. *et al.*,2025).

تتميز ليبيا بتنوعها البيئي والجغرافي الواسع الذي يمتد من السواحل البحرية في الشمال إلى الواحات والمناطق الصحراوية في الجنوب، ومن الجبال في الغرب والشرق إلى السهول والهضاب؛ مما يخلق ظروفاً فريدة لنحل العسل، وينتج عنه أنواعاً متعددة تختلف في خصائصها وجودتها، ومع ذلك، فإن الدراسات العلمية التي تناولت توصيف العسل الليبي لا تزال محدودة، وتفتقر إلى استخدام المنهجيات الإحصائية المتقدمة التي تسمح بفهم شامل للعلاقات بين المتغيرات المختلفة وتصنيف العينات بناءً على خصائصها المتعددة.

بيانات هذه الدراسة هي من نوع البيانات متعددة المتغيرات (Multivariate Data)، وهي ناتجة عن قياس عدد كبير من الخصائص الفيزيوكيميائية لعينات العسل، هذا النوع من البيانات يمثل تحدياً منهجياً يتطلب استخدام تقنيات إحصائية متقدمة، فمع وجود عشرة مؤشرات تم قياسها لـ 28 عينة، تصبح المقارنة المباشرة بين العينات باستخدام الإحصاءات الوصفية التقليدية غير كافية لاستكشاف الأنماط الكامنة والعلاقات المعقدة بين المتغيرات، تمتلك التقنيات الإحصائية مثل تحليل المكونات الرئيسية *(PCA)* والتحليل العنقودي *(Cluster Analysis)* الإمكانية لاستخلاص المعلومات الأكثر أهمية من البيانات متعددة الأبعاد، وتحديد المتغيرات الأكثر تأثيراً في تفسير التباين بين العينات، وتصنيف العينات إلى مجموعات متجانسة وفقاً لخصائصها الفيزيوكيميائية، دون فقدان الدقة العلمية أو التعقيد المنهجي. يساهم استخدام هذه التقنيات الإحصائية المتقدمة في مجال تحليل الأغذية في إثراء الأدبيات العلمية حول تطبيقات الإحصاء متعدد المتغيرات في العلوم التطبيقية، وبناء قاعدة معرفية حول الخصائص الكيميائية والفيزيائية للعسل الليبي، الذي لم يحظ بدراسات كافية مقارنة بمنتجات العسل في مناطق أخرى من العالم. كما يمكن استخدام النتائج التي توصلت إليها الدراسة في وضع معايير مرجعية لجودة العسل الليبي، وتطوير أنظمة لمراقبة الجودة تعتمد على المؤشرات الأكثر تأثيراً في تمييز العينات، إلى جانب ذلك، يمكن أن تسهم قدرة تمييز العسل حسب مصدره النباتي والجغرافي في تعزيز قيمة المنتج المحلي وحماية المستهلك من الغش التجاري؛ مما يدعم قطاع تربية النحل ومنتجاته في ليبيا.

حدود الدراسة

تواجه هذه الدراسة بعض الحدود التي ينبغي مراعاتها عند تفسير النتائج:

- اقتصرت الدراسة على 28 عينة فقط، وهو حجم قد لا يمثل التنوع الكامل للعسل الليبي في جميع مناطق البلاد.
- تم قياس عشرة مؤشرات فقط، في حين أن هناك مؤشرات أخرى (مثل مضادات الأكسدة، النشاط الإنزيمي) يمكن أن تضيف أبعاداً أخرى للتحليل.
- لم تشمل الدراسة جميع المناطق الجغرافية الليبية بالتساوي.
- تم جمع العينات في فترة زمنية محدودة؛ مما لا يعكس التغيرات الموسمية في خصائص العسل.

تحليل المكونات الرئيسية *Principal Component Analysis*)

تحليل المكونات الرئيسية *(PCA)* هو أسلوب إحصائي متعدد المتغيرات يجمع المعلومات من عدة متغيرات ملاحظة على نفس الأفراد في عدد أقل من المتغيرات، تُسمى المكونات الرئيسية *(PCs)*، تقاس "المعلومات" بالتباين الكلي للمتغيرات الأصلية، وتُفسر المكونات الرئيسية الجزء الأكبر من هذا التباين على النحو الأمثل، تتميز المكونات الرئيسية بخصائص هندسية تتيح تفسيراً بديهياً ومنظماً للسمات الرئيسية الكامنة في مجموعة بيانات معقدة متعددة المتغيرات. رياضياً، يعتمد *PCA* على تحليل القيم الذاتية والمتجهات الذاتية للمصفوفات شبه الموجبة.

أهداف تحليل المكونات الرئيسية: *(Abdi & Williams, 2010)*

1. استخلاص أهم المعلومات من جدول البيانات.
2. ضغط حجم مجموعة البيانات بالاحتفاظ فقط بهذه المعلومات المهمة.
3. تبسيط وصف مجموعة البيانات.
4. تحليل بنية المشاهدات والمتغيرات.

لتحقيق هذه الأهداف، يُحسب تحليل المكونات الرئيسية متغيرات جديدة تسمى المكونات الرئيسية، والتي تستخلص كتركيبات خطية للمتغيرات الأصلية، يُشترط أن يكون للمكون الرئيسي الأول أكبر تباين ممكن؛ (أي: أكبر قدر من القصور الذاتي)، وبالتالي سيفسر هذا المكون الجزء الأكبر من قصور جدول البيانات، يُحسب المكون الثاني مع مراعاة شرط أن يكون متعامداً مع المكون الأول، وأن يكون له أكبر قدر ممكن من القصور الذاتي، وتُحسب المكونات الأخرى بنفس الطريقة. وتسمى قيم هذه المتغيرات الجديدة للملاحظات بدرجات العوامل *(Scores)*، ويمكن تفسيرها هندسياً على أنها إسقاطات البيانات الأصلية على المكونات الرئيسية.

التحليل العنقودي *(Cluster Analysis)*

التحليل العنقودي هو مجموعة من التقنيات الإحصائية التي تهدف إلى تصنيف العناصر (العينات) إلى مجموعات (عناقيد)؛ بحيث تكون العناصر داخل المجموعة الواحدة متشابهة قدر الإمكان، والعناصر في المجموعات المختلفة مختلفة قدر الإمكان، يقوم التحليل العنقودي باكتشاف الأنماط الطبيعية في البيانات، وتبسيط البيانات بتقليل عدد المجموعات، ثم تصنيف العينات إلى فئات ذات معنى، يعتمد التحليل العنقودي الهرمي على قياس المسافات أو التشابه بين العناصر؛ حيث تُستخدم مقاييس مثل المسافة الإقليدية *(Euclidean Distance)* أو مسافة مانهاتن *(Manhattan Distance)* لتحديد درجة القرب بين العينات، توجد عدة طرق مختلفة لإجراء تحليل التجميع العنقودي، ويمكن تصنيفها كما يلي:

التحليل الهرمي *(Hierarchical Clustering)*

وهناك طريقتين للتحليل الهرمي:

– الطرق التجميعية *(Dendrogram)*؛ حيث يبدأ كل عنصر في مجموعة منفصلة، ثم تُدمج المجموعتان "الأقرب" (الأكثر تشابهًا)، وتُكرر هذه العملية حتى تصبح جميع العناصر في مجموعة واحدة، في النهاية، يُختار العدد الأمثل للمجموعات من بين جميع حلول التجميع.

– الطرق التقسيمية *(Divisive methods)*؛ حيث تبدأ جميع العناصر في نفس المجموعة، وتُطبق الاستراتيجية السابقة بشكل عكسي حتى يصبح كل عنصر في مجموعة منفصلة.

التحليل غير الهرمي *(Non-hierarchical Clustering)*

المعروف غالبًا باسم طرق *K-Means*، الذي يتطلب تحديد عدد المجموعات مسبقاً، وفي هذه الدراسة، تم استخدام التحليل العنقودي الهرمي بطريقة وارد *(Ward's Method)* مع المسافة الإقليدية؛ حيث تعمل طريقة *Ward* على دمج العناقيد بطريقة تقلل التباين داخل العنقود الواحد.

لقد شهدت العقود الأخيرة تزايدا ملحوظا في استخدام التقنيات الإحصائية متعددة المتغيرات في تحليل العسل على المستوى الدولي، أهتمت دراسة (Inaudi P. *et al.*, 2025) في إيطاليا على التركيب غير العضوي، وخاصة المعادن وأشباه المعادن، كبصمات محتملة لتحديد الأصل النباتي أو الجغرافي، وتمت معالجة البيانات وتحليلها باستخدام تقنيات القياس الكيميائي، بما في ذلك: تحليل المكونات الرئيسية وتحليل التجميع الهرمي، وكشفت هذه الأساليب عن سمات مشتركة تميز أنواع العسل حسب منشئها. في دراسة أجريت من قبل (اشكورفو، وآخرون. 2024) لتقدير بعض الخواص الفيزيائية والكيميائية لبعض عينات عسل النحل الموجودة في السوق المحلي لمدينة الخمس، شملت الدراسة 6 عينات لـ 5 أنواع من عسل النحل؛ حيث أشارت النتائج الإجمالية للمعايير الفيزيائية والكيميائية إلى أن الجودة الغذائية للعسل كانت تختلف من نوع إلى آخر ومن مكان إلى آخر، وكانت النتائج المتوسطة للخواص الكيميائية والفيزيائية الموجودة في عينات العسل تشير إلى أن العسل كان ضمن منطقة الدراسة آمن للاستهلاك البشري وفقا لمعايير الدستور الغذائي. ولقد قامت (زبيدة، سالمة. وآخرون، 2019) بدراسة شملت 24 عينة، للتحقق من الخصائص الفيزيائية والكيميائية لعينات عسل النحل التي جُمعت من 8 مواقع مختلفة في غرب ليبيا، وتم تحديد تركيز العناصر الأساسية: (الصوديوم والبوتاسيوم، والكالسيوم) والمعادن الثقيلة السامة: (الرصاص، والكادميوم، والزئبق، والزرنيخ) في عينات العسل، واقتصرت دراستها على الإحصاءات الوصفية وتحليل التباين الأحادي في تحليل الخصائص الفيزيوكيميائية لعينات من العسل الليبي من مناطق غرب ترهونة؛ حيث أظهرت النتائج تبايناً واسعاً في الخصائص وفقاً للمصدر النباتي. كما اهتمت دراسة (علوان، عبيد 2005) بالخصائص الطبيعية والكيميائية لعسل النحل المنتج في غرب ليبيا، واقتصرت الدراسة على الإحصاء الوصفي دون استخدام التقنيات متعددة المتغيرات. كما قام (Abd-Alslam, H., *et al.* 2023) بدراسة 8 خصائص فيزيوكيميائية على 20 عينة عسل ليبي من مناطق مختلفة في ليبيا، وخلصت الدراسة إلى وجود اختلاف في الخصائص بين عينات العسل دون تمييز الأنواع المختلفة للعسل. وقامت (Boufa, N., *et al.* 2020) بتقييم جودة 3 أنواع من العسل: عسل السدر، عسل الزعتر، والعسل الربيعي، فجمعت 12 عينة عسل من مدينة الزاوية، وتوصلت في دراستها إلى أن الحموضة عالية ونسبة الرطوبة منخفضة في الأنواع الثلاثة، واقتصر التحليل الإحصائي على: المتوسط الحسابي، والمدى والانحراف المعياري، والانحدار الخطي البسيط.

الفجوة البحثية ومبررات الدراسة

من خلال استعراض الأدبيات السابقة، يمكن تحديد الفجوات البحثية التالية التي تبرر إجراء هذه الدراسة:

1. ندرة الدراسات في ليبيا، فلم تتوصل المراجعة الأدبية إلى دراسة ليبية شاملة استخدمت التقنيات الإحصائية متعددة المتغيرات تحليل المركبات الرئيسية *(PCA)* والتحليل العنقودي *Cluster analysis* لتحليل العسل الليبي؛ حيث اقتصرت جميع الدراسة الليبية على الإحصاءات الوصفية، واختبارات الفروق البسيطة، وتحليل التباين، والانحدار الخطي البسيط.
2. عدم تكامل المنهجية، رغم وجود دراسات عربية ودولية استخدمت *PCA* أو التحليل العنقودي بشكل منفرد، فإن الدراسات التي جمعت بين التقنيتين بشكل منهجي متكامل لا تزال محدودة، خاصة في منطقة شمال إفريقيا.
3. تعدد المؤشرات، معظم الدراسات السابقة اقتصرت على عدد محدود من المؤشرات

الفيزيوكيميائية (4 - 8 مؤشرات)، بينما تضمنت هذه الدراسة 10 مؤشرات تغطي الجوانب المعدنية والفيزيوكيميائية.

الخصائص الفيزيوكيميائية للعسل

السكريات المختزلة (*Reducing Sugars*)

تمثل السكريات المختزلة (الفركتوز والجلوكوز بشكل رئيسي) المكون الأكبر للعسل؛ حيث تتراوح نسبتها بين 65% إلى 85% من إجمالي المكونات *(Bogdanov et al., 2008)*، تلعب السكريات دوراً حاسماً في تحديد قيمة العسل الغذائية، كما تؤثر على خصائصه الفيزيائية، مثل: اللزوجة والقابلية للتبلور (Khalil et al., 2012)، تشترط المواصفات العالمية للعسل (Codex Alimentarius, 2001) ألا تقل نسبة السكريات المختزلة عن 60% (لأغلب أنواع العسل) أو 45% (لعسل المن).

الحموضة الحرة (Free Acidity)

تعكس الحموضة الحرة للعسل محتواه من الأحماض العضوية (خاصة حمض الجلوكونيك) التي تتكون نتيجة نشاط إنزيم الجلوكوز أوكسيديز، تتراوح الحموضة الحرة في العسل الطبيعي بين 8 و 40 ملي مكافئ/كغم، ارتفاع الحموضة عن الحد المسموح به (40 ملي مكافئ/كغم) قد يشير إلى تخمر العسل أو سوء التخزين *(Bogdanov et al., 2008)*.

الرماد الكلي (Ash Content)

يعكس محتوى الرماد الكلي للعسل ثراءه بالعناصر المعدنية: (البوتاسيوم، الكالسيوم، المغنيسيوم، والصوديوم، والفسفور، والكبريت وغيرها)، ويتفوق البوتاسيوم في نسبته عن باقي العناصر، ويتراوح عادة بين 0.1% و 0.8% ، ويعتبر محتوى الرماد مؤشراً جيداً على المصدر الجغرافي للعسل؛ حيث يعكس التركيب المعدني للتربة والنباتات في المنطقة *(Bogdanov et al., 2008)*.

الموصلية الكهربائية (Electrical Conductivity)

تمثل الموصلية الكهربائية مقياس أساسي لتركيز الأملاح المعدنية والأحماض العضوية في العسل *(Bogdanov et al., 2008)*، تتراوح الموصلية الكهربائية للعسل الزهري بين 200 و 800 ميكروسيمنز/سم، بينما تكون أعلى في عسل المن (800 - 1500 ميكروسيمنز/سم)، تعتبر الموصلية الكهربائية من أقوى المؤشرات التمييزية بين أنواع العسل المختلفة.

الامتصاصية (Absorbance)

تعد الامتصاصية للعسل القدرة على امتصاص رطوبة الهواء الجوي؛ حيث إنهُ عند المستويات العالية للرطوبة النسبية للهواء تزيد رطوبتهُ، وعند المستويات المنخفضة للرطوبة النسبية للهواء يفقد جزءاً من رطوبته، ويحتوى العسل على الماء بنسبة أقل من أو يساوى 18.3% *(Anklam, 1998)*.

العناصر الثقيلة (Heavy Metals)

المعادن الثقيلة في العسل تمثل الرصاص والزنك والنحاس والكوبالت والحديد وهي من المكونات الثانوية في العسل، لكنها تحمل أهمية كبيرة من منظور الصحة العامة وجودة المنتج، يمكن أن تصل هذه المعادن إلى العسل من خلال مصادر مختلفة: التربة، مياه الري، المبيدات الزراعية، والتلوث البيئي *(Bogdanov et al., 2008)*.

مواد وطرائق البحث

جمع العينات وتجهيزها: تم جمع 28 عينة من العسل من مناطق مختلفة في غرب ليبيا، شملت: نالوت، الرحيبات، يفرن، الرياينة، ككلة، الزنتان، الرجبان، العربان، غريان، العجيلات، والجفارة؛ حيث تمثل العينات ستة أصول نباتية زهرية *(floral types)* رئيسية هي: الزعتر، الربيع، السدر، الأثل، الحرمل، والجرجير، جُمعت العينات مباشرة من مربي النحل المحليين خلال موسم إنتاج واحد لضمان التجانس.

التحاليل الفيزيوكيميائية:

تم قياس عشرة مؤشرات فيزيوكيميائية لكل عينة، وأظهرت النتائج أن جميع العينات تتوافق مع الاشتراطات القياسية للمواصفات الليبية والدولية، هذه المؤشرات هي:

المعادن الثقيلة: (الرصاص *Pb* ، الزنك *Zn* ، الكوبالت *Co* ، النحاس *Cu* ، الحديد *Fe*).

السكريات المختزلة *(RS)*.

الحموضة الحرة *(FA)*.

الرماد *(Ash)*.

التوصيل الكهربائي *(EC)*.

الامتصاصية *(Abs)*.

أُجريت جميع التحاليل ثلاث مرات، وتم استخدام متوسط هذه التحاليل الثلاثة في التحليل الإحصائي.

التحليل الإحصائي

نظراً لطبيعة البيانات، متعددة المتغيرات (10 متغيرات لـ 28 عينة)، فإن الإحصاءات الوصفية أحادية المتغير وحدها لا تكفي لكشف الأنماط الكامنة؛ لذلك طُبقت تقنيتان إحصائيتان متعددتا المتغيرات (تحليل المكونات الرئيسية *PCA* وتحليل الهرمي العنقودي *HCA*).

تحليل المكونات الرئيسية*(PCA) :*

طُبق تحليل المكونات الرئيسية لتقليل أبعاد البيانات؛ مما يزيد من سهولة تفسيرها، ويقلل في الوقت نفسه من فقدان المعلومات، ويتحقق ذلك من خلال إنشاء متغيرات جديدة غير مترابطة تعمل تباعاً على زيادة التباين، ويختزل إيجاد هذه المتغيرات الجديدة؛ أي: المكونات الرئيسية، إلى حل مسألة القيم الذاتية والمتجهات الذاتية، وتُحدد هذه المتغيرات الجديدة بناء على مجموعة البيانات المتاحة، وتحديد أكثر المتغيرات تأثيراً، وتصور العلاقات بين العينات والمتغيرات، ومن المهم أجرى التحليل على مصفوفة بيانات وسيطية وموحدة $(\mu = 0,\ \sigma = 1)$ لمنع هيمنة المتغيرات ذات المقاييس الأكبر على النتائج (*Jolliffe & Cadima*, 2016). تم تحديد عدد المكونات الرئيسية المراد الاحتفاظ بها باستخدام معيار كايزر (قيمة ذاتية >1) والنسبة المئوية للتباين المتراكم، تم تفسير المكونات الرئيسية بناء على قيم الأحمال (loadings)؛ حيث اعتبرت الأحمال التي تزيد قيمتها المطلقة عن 0.6 كبيرة.

التحليل الهرمي العنقودي(*HCA*) :

قمنا باستخدام التحليل الهرمي العنقودي لتصنيف العينات الـ 28 إلى مجموعات متجانسة استناداً إلى التشابه الكلي في صفاتها الفيزيوكيميائية؛ حيث استخدمت مسافة إقليدس كمقياس للتباين، وطُبقت طريقة وارد (Ward's method) للتجميع، قُطعت شجرة التجميع (Dendrogram) عند مستوى تشابه مناسب لتحديد المجموعات النهائية.

النتائج والمناقشة

الإحصاءات الوصفية ومصفوفة الارتباط

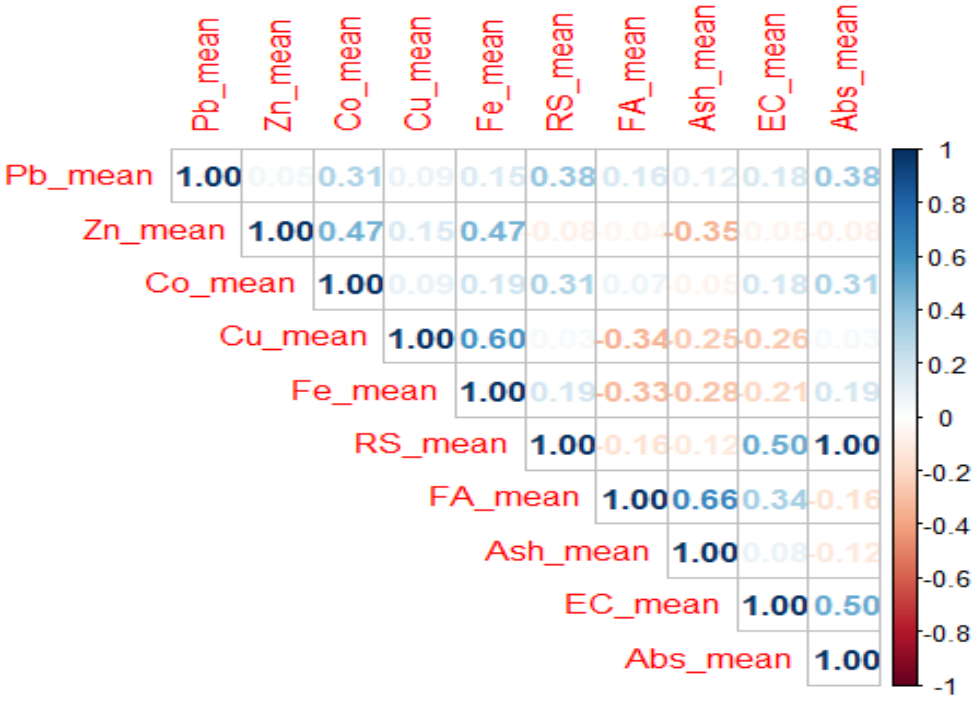
تكونت مجموعة البيانات من 28 مشاهدة و 10 متغيرات تمثل الخصائص الكيميائية والفيزيائية لعسل النحل الطبيعي، كشف الفحص الأولي للإحصاءات الوصفية: (المتوسط، الانحراف المعياري، الحد الأدنى، الحد الأقصى) الجدول (1) يوضح ذلك، عن وجود تشتت كبير لمعظم العناصر، خاصةً الرماد الكلي: (Ash)(CV = 64.6) والكوبالت (Co) والنحاس (Cu) (CV = 39, 38.5)، كذلك الحديد والرصاص، مما يشير إلى إمكانية التمييز الناجح بين عينات العسل المختلفة، وأظهرت مصفوفة الارتباط كما يوضح الجدول (2) التالي وجود ارتباطات موجبة متوسطة إلى قوية بين العديد من المعادن الثقيلة (الزنك مع الكوبالت r = 0.62 ، الحديد مع النحاس r = 0.60)، وارتباط موجب ملحوظ بين (الرماد الكلي والحموضة الحرة r = 0.66)، وهو أمر مقبول كيميائياً.

المجلة الليبية للعلوم الزراعية، المجلد (31)، العدد (2): 49 - 63

جدول 1. الإحصاء الوصفي

Variable	Mean	Median	SD	Min	Max	معامل الاختلاف CV
Pb	0.003743	0.0036	0.001056	0.0023	0.0081	28.213693
Zn	2.75324	2.8441	0.52571	0.8866	3.6033	19.09411
Co	0.01549	0.013	0.00604	0.006	0.0332	39.01895
Cu	0.633589	0.56825	0.24381	0.2732	1.2342	38.48071
Fe	4.679886	4.4817	1.29457	1.307	8.1654	27.66248
RS	74.275	73.3	4.8374	65	83.7	6.51283
FA	27.09286	26.7	6.50207	14.9	40.1	23.99922
EC	459.90357	439.35	61.98716	364.9	569.8	13.47829
Ash	0.20964	0.21	0.13552	0.02	0.48	64.64479
Abs	0.14855	0.1466	0.009675	0.13	0.1674	6.51283

جدول 2. مصفوفة الارتباط



تحليل المكونات الرئيسية (PCA)

الجدول (3) يعرض نتائج تحليل المكونات الرئيسية؛ حيث أسفرت النتائج عن أربعة مكونات رئيسية بقيم ذاتية أكبر من 1، المكونات الرئيسية الثلاثة الأولى فسرت مجتمعة 68.4% من التباين الكلي، المكون الرئيسي الأول (PC1) فسر ما نسبته 28.6% من التباين، وارتبط المكون الرئيسي الأول بشكل أساسي بالمعادن الثقيلة والحموضة الحرة، المكون الرئيسي الثاني (PC2) فسر ما نسبته 25% من التباين وارتبط بالسكريات المختزلة والتوصيل الكهربائي، المكون الرئيسي الثالث (PC3) فسر ما نسبته 14.8% من التباين، وأظهر أحمال عالية لكل من محتوى الرماد الكلي والامتصاصية.

جدول 3. تحليل المكونات الرئيسية

```
==========================================================================
          تحليل المكونات الرئيسية (PCA) لتمييز أنواع العسل
==========================================================================

 نسبة التباين المفسرة:
Importance of components:
                          PC1    PC2    PC3    PC4     PC5     PC6
Standard deviation     1.6899 1.5825 1.2176 1.0441 0.81490 0.74152
Proportion of Variance 0.2856 0.2504 0.1482 0.1090 0.06641 0.05498
Cumulative Proportion  0.2856 0.5360 0.6842 0.7933 0.85966 0.91465
                           PC7     PC8       PC9       PC10
Standard deviation       0.68684  0.45666  0.41624  6.909e-16
Proportion of Variance   0.04718  0.02085  0.01733  0.000e+00
Cumulative Proportion    0.96182  0.98267  1.00000  1.000e+00

تحميلات المتغيرات (Loadings):
                              PC1    PC2    PC3    PC4
الرصاص (Pb)                -0.295 -0.180  0.253 -0.407
الزنك (zn)                  -0.181  0.276  0.528  0.414
الكوبالت (Co)               -0.329 -0.033  0.474  0.221
النحاس (Cu)                 -0.193  0.386  0.037 -0.481
الحديد (Fe)                 -0.309  0.378  0.177 -0.273
السكريات المختزلة (Rs)      -0.506 -0.233 -0.244 -0.032
الحموضة الحرة (FA)           0.177 -0.410  0.464 -0.103
الرماد الكلى (Ash)           0.215 -0.378  0.255 -0.460
الموصلية الكهربائية (Ec)    -0.225 -0.423 -0.018  0.289
الامتصاصية (Abs)            -0.506 -0.233 -0.244 -0.032
```

جدول 4. القيم الذاتية والتباين الموضح للمكونات الرئيسية الأربع الأولى.

المكون الرئيسي	القيمة الذاتية	التباين المفسر (%)	التباين التراكمي (%)
PC1	2.86	28.6	28.6
PC2	2.50	25.0	53.6
PC3	1.48	14.8	68.4
PC4	1.1	11.0	79.4

المكون الأول- PC1 يفسر 28.56%: السكريات المختزلة (RS) والامتصاصية (Abs) لهما أعلى وزن سالب (-0.506)، الحموضة الحرة (FA) والرماد الكلي (Ash) لهما وزن موجب، المعادن (Pb, Zn, Co, Cu, Fe, EC) لها أوزان سالبة.

المجلة الليبية للعلوم الزراعية، المجلد (31)، العدد (2): 49 - 63

التفسير العلمي: PC1 تمثل التباين بين المواد الصلبة الذائبة والامتصاصية من جهة، وبقية الخصائص من جهة أخرى، الاتجاه السالب PC1، عسل ذو RS و Abs عاليين، مواد صلبة ذائبة عالية وامتصاصية عالية، مؤشرات على عسل طبيعي كثيف، الاتجاه الموجب PC1 ، عسل ذو FA و Ash مرتفعين، حموضة عالية ورماد عالي ومعادن متوسطة، نستنتج أن PC1 تفصل بين العسل ذي الكثافة العالية (RS, Abs) والعسل ذي الحموضة والرماد العاليين (FA, Ash).

المكون الثاني- PC2 يفسر 25.04%: الموصلية الكهربائية (EC) والحموضة الحرة (FA) لهما أعلى وزن سالب، النحاس (Cu) والحديد (Fe) لهما أعلى وزن موجب.

التفسير العلمي: PC2 تمثل التباين بين التوصيل الكهربائي والحموضة مقابل النحاس والحديد، الاتجاه السالب عسل ذو توصيل كهربائي عالي وحموضة عالية، قد يشير إلى محتوى معدني ذائب أو نضج عالي، الاتجاه الموجب عسل ذو نحاس وحديد مرتفعين، قد يشير إلى تلوث معدني أو مصدر تربة معين. نستنتج أن PC2 تفصل بين العسل ذي الخصائص الكهربائية والحموضة (ربما جودة) والعسل ذي التلوث بالنحاس والحديد مع أنهم ضمن المواصفات الليبية.

المكون الثالث- PC3 يفسر 14.83%: الزنك (Zn) والكوبالت (Co) والحموضة الحرة (FA) لها أوزان موجبة عالية، السكريات المختزلة (RS) والامتصاصية (Abs) لهما أوزان سالبة.

التفسير العلمي: PC3 تمثل التباين بين الزنك والكوبالت والحموضة مقابل المواد الصلبة الذائبة، قد تعكس اختلافات في نوعية التربة أو مصدر العسل.

المكون الرابع- PC4 يفسر 10.90%: الرصاص (Pb) والنحاس (Cu) والرماد الكلي (Ash) لها أعلى أوزان سالبة، بينما الزنك (Zn) له أعلى وزن موجب.

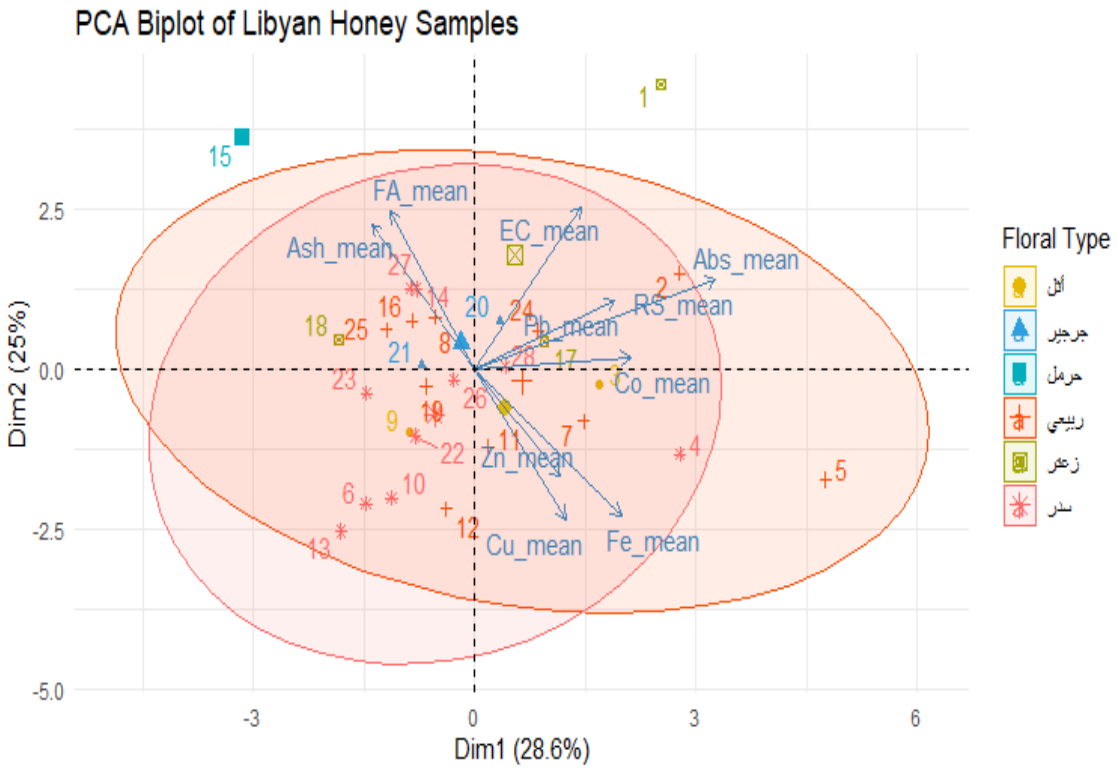
التفسير العلمي: PC4 تمثل التباين بين النحاس والرصاص والرماد مقابل الزنك اختلافات في تركيبة المعادن الثقيلة.

إسقاط المتغيرات على المكونات الرئيسية

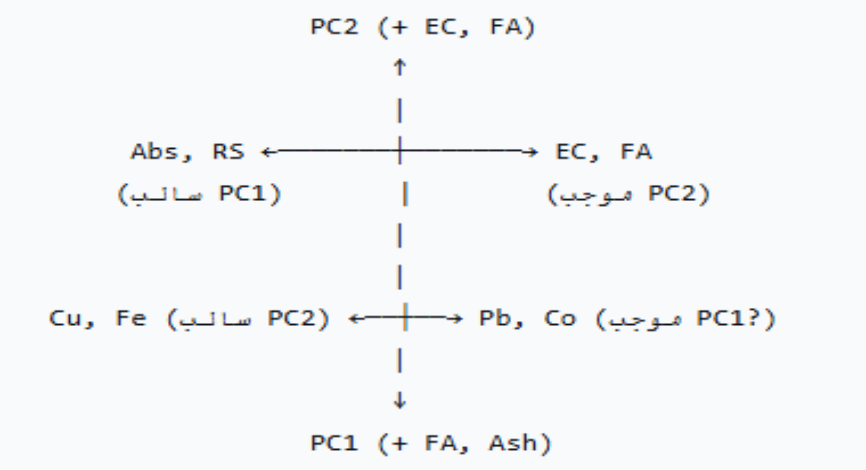
الشكل (1) التالي يظهر مخطط المكونات الرئيسية (Biplot)؛ حيث يبين توزيع العينات والمتغيرات على مستوى المكونين الرئيسيين الأول والثاني؛ حيث السكريات المختزلة (RS) والامتصاصية (Abs) متطابقان تماما لهم نفس القيم في PC1 ، وهذا يدل على ارتباط كامل تقريباً، الحموضة الحرة (FA) والرماد الكلي (Ash) قريبان من بعضهما على PC1 و PC2 ؛ أي: أنهما يرتبطان إيجابياً، النحاس (Cu) والحديد (Fe) قريبان من بعضهما في الاتجاه السالب لـ PC2 ؛ أي: أنهما يرتبطان إيجابياً مع بعضهما.

السكريات المختزلة والامتصاصية في اتجاه معاكس مع الحموضة الحرة والرماد على PC1؛ أي: علاقة عكسية، ويشير ذلك إلى أن زيادة المواد الصلبة يقابلها انخفاض في الحموضة والرماد والعكس.

طول السهم (جودة التمثيل) السكريات المختزلة والحموضة الحرة والرماد الكلي وكذلك الامتصاصية لهم سهم طويل (بعيدة عن نقطة الأصل)، وهذا يدل على أنها ممثلة جيداً في مستوى PC1، بينما الرصاص والنحاس والحديد والتوصيل الكهربائي تحتاج إلى المستوى PC2 لتمثيلها بشكل أفضل، أما الزنك والكوبالت فتحتاج إلى المستوى PC3 لتمثيلها بشكل أفضل.



شكل 1. إسقاط المتغيرات على المكونات الرئيسية



شكل 2. يوضح تعامد المتجهين الأول والثاني (PC1, PC2)

المجلة الليبية للعلوم الزراعية، المجلد (31)، العدد (2): 49 - 63

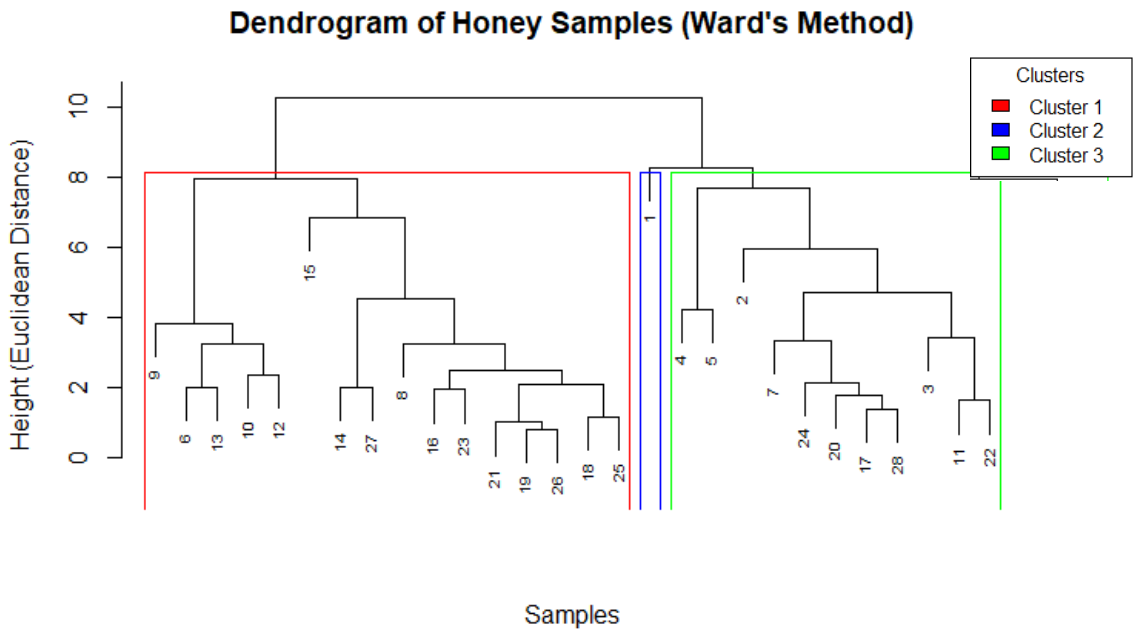
التحليل الهرمي العنقودي (HCA)

أظهر الشكل (3) التالي مخطط الشجرة التصنيفية (*Dendrogram*) الذي تم إنشاؤه باستخدام طريقة وارد ومسافة إقليدس؛ حيث تم فصل العينات الـ 28 بوضوح إلى ثلاث مجموعات (عناقيد) رئيسية عند مسافة ارتباط (*linkage distance*) تقارب 8.

المجموعة الأولى- (العنقود 1) تضم 16عينة, هذه هي المجموعة الأكبر والأكثر تنوعاً، وضمت معظم عينات: العسل الربيعي، الجرجير، والأثل، بالإضافة إلى 3 من 4 عينات الزعتر ومناطق مختلفة، تميزت هذه المجموعة بانخفاض محتوى الرماد (متوسط = 0.13%)، وحموضة متوسطة (متوسط FA = 24.8 ملي مكافئ/كغم)، وتركيزات متوسطة من المعادن الثقيلة، يمكن أن نطلق عليها العسل الليبي النموذجي.

المجموعة الثانية- (العنقود 2) عدد العينات 1, ضمت هذه المجموعة حصرياً عينة عسل الزعتر من منطقة نالوت، تميزت أعلى نسبة رصاص (0.0081)، أعلى نسبة رماد (0.48%)، ومن أعلى قيم التوصيل الكهربائي (566.9) ونسبة حموضة عالية جداً (38)، يمكن أن نطلق عليها العسل المتميز أو العسل الشاذ.

المجموعة الثالثة- (العنقود 3) عدد العينات 11، ضمت هذه المجموعة جميع عينات السدر بالإضافة إلى عينة الحرمل من الرياينة، تميزت بارتفاع متوسط السكريات المختزلة (متوسط RS = 80.1%)، وانخفاض الحموضة (متوسط FA = 21.3 ملي مكافئ/كغم)، وأدنى مستويات للمعادن الثقيلة: (الرصاص، الكوبالت، النحاس)، عسل هذه المجموعة الأكثر تميزاً وثبات كيميائي.



شكل 3. توزيع العينات على العناقيد الرئيسية

المجلة الليبية للعلوم الزراعية، المجلد (31)، العدد (2): 49 - 63

لقد أثبتت هذه الدراسة فعالية التقنيات الإحصائية تحليل المكونات الرئيسية *(PCA)* والتحليل الهرمي العنقودي *(HCA)* في التمييز بين عينات العسل الليبي بناء على أصلها الزهري باستخدام المتغيرات (الخصائص الكيميائية والفزيائية) لعينات العسل، المكونات الرئيسية الثلاثة الأولى فسرت ما نسبته 68.42% من التباين الكلي، وهي نسبة مقبولة نستطيع من خلالها استخدام المتجهات المتعامدة الثلاثة الأولى (المكونات الرئيسية الثلاثة الأولى) لدراسة العلاقات الإحصائية بين الخصائص المختلفة محل الدراسة.

تفسير المكونات الرئيسية الثلاثة الأولى: سجلت السكريات المختزلة *(RS)* والامتصاصية *(Abs)* أعلى حمل سالب (0.506-) على *PC1*، بينما سجلت الحموضة الحرة *(FA)* والرماد الكلي *(Ash)* حملين موجبين ضعيفين (0.177 و 0.215 على التوالي)، يعكس هذا التضاد العلاقة العكسية بين محتوى العسل من السكريات ومحتواه من الأملاح المعدنية والأحماض، العينات ذات القيم السالبة على *PC1* مثل عسل السدر تمتاز بارتفاع السكريات المختزلة *RS* وانخفاض الحموضة *FA* والرماد *Ash* ، مما يشير إلى عسل نقي عالي الجودة، بالمقابل العينات ذات القيم الموجبة (مثل عسل الزعتر) تمتاز بارتفاع الحموضة *FA* والرماد *Ash*، مستويات الرصاص *(Pb)* تتراوح بين 0.0023-0.0081 ملغم/كغم، وهي أقل بكثير من الحد المسموح به في المواصفات العالمية للعسل (0.1 ملغم/كغم)، مما يشير إلى سلامة المنتج فيما يتعلق بهذا الملوث.

سجلت المعادن الزنك *(Zn)* والنحاس *(Cu)* والحديد *(Fe)*، حمولات موجبة على *PC2* ، 0.378، بينما سجلت الموصلية الكهربائية *(EC)* والحموضة الحرة *(FA)* حمولات سالبة، هذا يشير إلى أن الموصلية الكهربائية رغم كونها مؤشر معروف لمحتوى المعادن الكلي (Khalil,. *et al.* 2012)، فإنها ترتبط عكسياً مع تركيزات النحاس والحديد والزنك بشكل منفرد، قد ينعكس هذا الاختلاف في أنواع المعادن السائدة، فالموصلية ترتبط أكثر بالمعادن القلوية (البوتاسيوم، الصوديوم) بينما *PC2*يلتقط المعادن الثقيلة.

سجل الزنك *(Zn)* والكوبالت *(Co)* أعلى حمولات موجبة على *PC3*، إلى جانب الحموضة الحرة، وهذا يشير إلى ارتباط هذه المعادن بمصادر زهرية محددة أو ظروف تربة حمضية، يعد الزنك عنصر نادر في العسل، وارتفاعه قد يكون مؤشراً على مصدر نباتي معين (مثل الزعتر)، الارتفاع ضمن المواصفات الليبية والعالمية.

الرؤى البيئية والجغرافية:

تكشف نتائج التحليل العنقودي عن تأثير زهري قوي، تتميز المجموعة الثانية (عسل الزعتر) بوضوح بارتفاع الحموضة الحرة والرماد الكلي والتوصيل الكهربائي، وتعزى هذه الخصائص إلى المركبات الفينولية والمعادن المشتقة من النباتات العطرية من جنس *Thymus*، غالباً ما يعتبر عسل الزعتر عسلاً طبياً عالي القيمة، ويمكن أن تكون هذه المعايير بمثابة مؤشرات ممتازة لتوثيقه.

تميزت المجموعة الثالثة (عسل السدر والحرمل) بانخفاض الحموضة والمعادن الثقيلة ولكن ارتفاع السكريات المختزلة، فشجرة السدر (*Ziziphus*) هي شجرة تتحمل الجفاف وتزهر في ظروف قاحلة، وتنتج رحيق بتركيز سكري عالي، وهو ما يفسر ارتفاع السكريات المختزلة، قد يعكس انخفاض محتوى المعادن الثقيلة في هذه المجموعة إلى المواقع النائية والأقل تصنيعاً؛ حيث يوجد السدر عادةً.

تظهر المجموعة الأولى كمجموعة على أنواع زهرية متنوعة (ربيع، جرجير، أثل)، وتتسم ملفاتها الفيزيوكيميائية بأنها أقل تطرفاً وتتداخل بشكل كبير؛ مما يجعل الفصل بينها أكثر صعوبة باستخدام هذه المتغيرات العشرة وحدها، يشير هذا إلى أن هناك حاجة لمؤشرات إضافية (مثل: التحليل الحبوبي، المركبات الطيارة) لإجراء تمييز أدق داخل هذه المجموعة.

الاستنتاج

تقدم هذه الدراسة أول تحليل متعدد المتغيرات شامل للخصائص الكيميائية والفيزيائية لعسل النحل الليبي باستخدام التقنيات الإحصائية تحليل المكونات الرئيسية *(PCA)* والتحليل الهرمي العنقودي *(HCA)* في تصنيف 28 عينة من غرب ليبيا إلى ثلاث مجموعات متميزة بناءً على أصلها الزهري، وتشمل النتائج الرئيسية ما يلي:

1. فسرت ثلاثة مكونات رئيسية 68.4% من التباين الكلي. كان المكون الرئيسي الأول (المعادن الثقيلة والحموضة الحرة)، والمكون الرئيسي الثاني (السكريات المختزلة والتوصيل الكهربائي) هما المحوران الأكثر تمييزاً.
2. تميز عسل الزعتر (المجموعة الثانية) بشكل فريد بارتفاع ملحوظ في: الحموضة الحرة، ومحتوى الرماد، والتوصيل الكهربائي؛ مما يجعله سهل التعرف.
3. تميز عسل السدر (المجموعة الثالثة) بانخفاض تركيزات المعادن الثقيلة وارتفاع السكريات المختزلة؛ مما يشير إلى جودة عالية وبيئة مصدرية نقية.
4. أظهرت عسول الربيعي والجرجير والأثل (المجموعة الأولى) خصائص متوسطة متداخلة؛ مما يستدعي الحاجة إلى مؤشرات أكثر تخصصاً للتمييز بينها.

التوصيات

1. اعتماد *PC1* و *PC2* كأساس لوضع معايير أولية لتمييز عسل السدر (قيم *PC1* سالبة منخفضة) وعسل الزعتر (قيم *PC1* موجبة مرتفعة).
2. إجراء تحليل حبوب اللقاح لعينات الزعتر الأربع لتحديد مدى نقاوتها.
3. توسيع التغطية الجغرافية لتشمل شرق وجنوب ليبيا، وإجراء التحليل الحبوبي (*melissopalynological*) لتأكيد الأصول الزهرية، قياس مؤشرات إضافية مثل المحتوى الفينولي الكلي والنشاط المضاد للأكسدة ونشاط إنزيم الدياستاز.

في الختام، أثبتت التقنيات الإحصائية متعددة المتغيرات مثل *PCA* و *HCA* أنها أدوات قوية وفعالة من حيث التكلفة لتوثيق ومراقبة جودة العسل الليبي، وتضع هذه الدراسة إطاراً منهجياً أساسياً يمكن توسيعه وتكييفه لحماية منتجات العسل الليبي من الغش، وتعزيز قيمتها التجارية محلياً ودولياً.

المراجع

اشكورفو، ربيعة. وآخرون. 2024. تقدير بعض الخواص الفيزيائية والكيميائية لبعض عينات عسل النحل الموجودة في السوق المحلي لمدينة الخمس. النسخة الإلكترونية مجلة كلية العلوم جامعة مصراتة، 17 – 22 صفحات.

زبيدة، سالمة وآخرون. 2019. دراسة بعض الخصائص الفيزيائية والكيميائية لعينات من عسل النحل منتجة في بعض مناطق غرب ترهونة - ليبيا. مجلة جامعة الزيتونة، 167 - 181 صفحات.

علوان، عبيد أبو القاسم. 2005. أنواع عسل النحل المنتج في غرب الجماهيرية العظمى ودراسة بعض خصائصه الطبيعية والكيميائية. جامعة الزاوية - مركز البحوث والدراسات العليا، 269 – 281 صفحات.

Abdi, H., & Williams, L. J. 2010. Principal component analysis. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2(4), 433-459.

Abd-Alslam, H., Azzouz, Azzelden, Elgool , Anwar, Abd Alraheem. 2023. Study and Estimation of Some Elements Content in Libyan Honey. Libyan Journal of Ecological & Environmental Sciences and Technology, *5* (2), 1-7.

Anklam. 1998. A review of the analytical methods to determine the geographical and botanical origin of honey. Food Chemistry, vol. 63, pp. 549-562.

Bogdanov, S., Jurendic, T., Sieber, R., & Gallmann, P. 2008. Honey for nutrition and health: A review. *Journal of the American College of Nutrition*, 27(6), 677-689.

Boufa, Najat Khalifa. 2020. Measurement of Some Physical Properties of Libyan Honey. International Science and Technology Journal, 1(29), 1-16

Codex Alimentarius Commission. 2001. *Revised Codex Standard for Honey*. Codex Stan 12-1981, Rev. 1 (1987), Rev. 2 (2001).

Inaudi, P., et al. 2025. Pollution profiling in Italian honeys: Elements and microplastics as comprehensive indicators of environmental contamination and food safety, Science of the Total Environment.

Jolliffe, I. T., & Cadima, J. 2016. Principal component analysis: A review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 374(2065), 20150202.

Khalil, M. I., Moniruzzaman, M., Boukraâ, L., Benhanifia, M., Islam, M. A., Islam, M. N., & Sulaiman, S. A. 2012. Physicochemical and antioxidant properties of Algerian honey. *Molecules*, 17(9), 11199-11215.

THE LIBYAN JOURNAL OF AGRICULTURE
Volume (31), No. (2), 2026: 49 - 63

Principal Component Analysis (PCA) and Cluster Analysis of the Physicochemical Characteristics of Honey Application to Libyan Samples

Hasan M. Rhoma

Department of Statistics - Faculty of Science - University of Tripoli

ABSTRACT

This study applies Principal Component Analysis (PCA) and Cluster Analysis to investigate the botanical and geographical classification of Libyan honey samples. The research examines physicochemical data from 28 honey samples collected across western Libya, representing six types: thyme, spring, sidr, tamarisk, harmal, and arugula. Ten parameters were measured per sample, including heavy metal concentrations (lead, zinc, cobalt, copper, iron) and quality indicators (reducing sugars, free acidity, total ash, electrical conductivity, absorbance). PCA results showed that the first three principal components captured 68.4% of total variance. PC1 (28.6%) was primarily associated with heavy metals and acidity, while PC2 (25.0%) linked to reducing sugars and electrical conductivity. Hierarchical cluster analysis using Ward's method grouped samples into three distinct clusters. Cluster 1 comprised spring, arugula, and tamarisk honeys, characterized by low ash content and moderate acidity. Cluster 2 exclusively included thyme honey, distinguished by notably high acidity and ash content. Cluster 3 contained sidr and harmal honeys, characterized by high reducing sugars and balanced remaining properties. The findings confirm the effectiveness of multivariate statistical techniques in discriminating and classifying honey samples according to their floral and geographical origins. This approach provides a robust methodological framework applicable to quality control and geographical origin authentication of honey. Additionally, the study contributes to the knowledge base on Libyan honey's physicochemical characteristics and opens avenues for future research incorporating broader environmental and climatic variables.

Key Words: Principle component analysis, cluster analysis, Libyan honey, physicochemical properties, multivariate statistics, quality control.

Corresponding Author: Hasan M. Rhoma **Department of Statistics - Faculty of Science - University of Tripoli**

Phone: +218 91 403 8156 **Email: h.rhoma@uot.edu.ly**

Received: 28/06/2026 **Accepted: 06/08/2026**