Scientific Journal for Publishing in Health Research and Technology

Volume 1, Issue 2, 2025, Pages: 241-256

Journal homepage: https://sjphrt.com.ly/index.php/sjphrt/en/index

Chemical Safety of Dairy Products: A Review Study on the Dynamics of Lead and Cadmium Accumulation

Ilyas Amer Said Salem [1], Rabiaa Abuazoum Ali Khalil [2*], Mohamed Omar Abdalla Salem [3]
[1,2] Department of Chemistry, Faculty of Education, Bani Waleed University, Libya
[3] Department of Biology, Faculty of Education, Bani Waleed University, Libya

الأمن الكيميائي لمنتجات الألبان: دراسة مرجعية حول ديناميكية تراكم الرصاص والكادميوم

إلياس عامر سعيد سالم [1]، ربيعة أبو عزوم علي خليل [2*]، محمد عمر عبد الله سالم [3]
[2،1] قسم الكيمياء، كلية التربية، جامعة بني وليد، ليبيا
[3] قسم الأحياء، كلية التربية، جامعة بني وليد، بني وليد، ليبيا

*Corresponding author: rabiaaa231@gmail.com

Received: September 27, 2025	Accepted: December 12, 2025	Published: December 24, 2025

Abstract:
This review study addresses the chemical safety of milk and dairy products, focusing on the dynamics of lead (Pb) and cadmium (Cd) accumulation. The research explores the complex pathways of these heavy metals, starting from environmental sources like contaminated soil, water, and phosphate fertilizers, through bioaccumulation in livestock, and ending with their secretion into milk. A critical focus is placed on the "manufacturing intensification" effect, where technological processes such as evaporation and curdling significantly concentrate these toxins in products like cheese. The study also evaluates the severe health risks, particularly neurotoxicity and nephrotoxicity, posed to sensitive groups like children. By synthesizing global data and international standards (Codex, EU), the paper provides strategic recommendations for monitoring environmental inputs and implementing advanced filtration technologies to ensure dairy safety.

Keywords: Chemical Safety, Lead, Cadmium, Bioaccumulation, Dairy Products, Risk Assessment.

الملخص:
تناول هذه الدراسة المرجعية الأمن الكيميائي للحليب ومشتقاته، مع التركيز على ديناميكية تراكم الرصاص والكادميوم .يستكشف البحث المسارات المعقدة لهذه المعادن الثقيلة، بدءاً من المصادر البيئية مثل التربة والمياه الملوثة والأسمدة الفوسفاتية، مروراً بالتراكم الحيوي في الماشية، وصولاً إلى إفرازها في الحليب .تم وضع تركيز محوري على ظاهرة "التضخم التصنيعي"، حيث تؤدي العمليات التكنولوجية مثل التبخير والتجبن إلى تركيز هذه السموم بشكل كبير في منتجات مثل الأجبان .كما تقيم الدراسة المخاطر الصحية الجسيمة، لا سيما السمية العصبية والسمية الكلوية، التي تتعرض لها الفئات الحساسة مثل الأطفال .ومن خلال دمج البيانات العالمية والمعايير الدولية (دستور الغذاء، الاتحاد الأوروبي)، تقدم الورقة توصيات استراتيجية لمراقبة المدخلات البيئية وتطبيق تقنيات الترشيح المتقدمة لضمان سلامة الألبان.

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

الكلمات المفتاحية :الأمن الكيميائي، الرصاص، الكادميوم، التراكم الحيوي، منتجات الألبان، تقييم المخاطر.

المقدمة

يحتل الحليب ومشتقاته مكانة مركزية في سُلم التغذية البشرية، حيث يُصنف كـ "غذاء مثالي" نظراً لتكامل تركيبته الكيميائية التي تلبي الاحتياجات الأيضية المعقدة. يتكون الحليب من مصفوفة معقدة تشمل بروتينات عالية الجودة (80% كازين و20% بروتينات شرش)، وأحماضاً دهنية مشبعة وغير مشبعة، وسكر اللاكتوز، بالإضافة إلى حزمة متكاملة من المعادن كالكالسيوم والفسفور والزنك.

تكمن الأهمية الاستراتيجية للألبان في كونها الحجر الزاوية لتغذية الفئات العمرية الحرجة (الرضع والأطفال)؛ حيث تدخل مكوناته في تكوين النسيج العظمي وتخليق النواقل العصبية (Bocchi et al., 2021).إلا أن هذه "المثالية التغذوية" مهددة بما يُعرف بـ الأمن الكيميائي.(Chemical Safety)

يعود السبب في حساسية الحليب العالية للملوثات إلى طبيعته الفيزيائية كـ مستحلب غروي (Colloidal Emulsion)؛ حيث تعمل كريات الدهون وبروتينات الكازين كأسطح مدمصة (Adsorbing surfaces) قادرة على جذب وربط الأيونات المعدنية الثقيلة. ويُعد الرصاص (Pb) والكادميوم (Cd) من أخطر هذه الملوثات نظراً لعدم وجود أي وظيفة بيولوجية معروفة لهما في الجسم البشري، وتصنيفهما ضمن الفئة الأولى للمسرطنات والمواد شديدة السُمية وفقاً للوكالة الدولية لبحوث السرطان(IARC) .

التراكم الحيوي ودورة المعادن الثقيلة في السلسلة الغذائية

إن تلوث الحليب بالرصاص والكادميوم ليس مجرد حدث عارض، بل هو تتويج لعمليات التراكم الحيوي (Bioaccumulation)والتضخم الحيوي (Biomagnification) عبر المستويات الغذائية المختلفة.

ديناميكية الكادميوم :(Cd) المسار الجهازي

يُعتبر الكادميوم عنصراً ذا انتقال "جهازي" عالي الكفاءة؛ حيث ينتقل من التربة المشبعة (بفعل الأسمدة الفوسفاتية أو مخلفات التعدين) إلى جذور النباتات العلفية عبر بروتينات النقل الخاصة بالمعادن الضرورية (مثل الزنك).

الميكانيكية الحيوية :عند تناول الماشية لهذه الأعلاف، يمتص الكادميوم في الأمعاء الدقيقة ويرتبط ببروتين الميتالوثيونين .(Metallothionein) هذا الارتباط يمنح الكادميوم استقراراً كيميائياً عالياً داخل أنسجة الحيوان (الكبد والكلى)، حيث يصل عمره النصفي إلى سنوات. وعند حدوث خلل في التوازن المعدني أو إجهاد فسيولوجي، يبدأ الحيوان بإفراز كميات متزايدة من الكادميوم في الحليب عبر النقل النشط في الغدد اللبنية.(Rahimi, 2013)

ديناميكية الرصاص :(Pb) المحاكاة الكيميائية

يتبع الرصاص مساراً مختلفاً غالباً ما يرتبط بالترسب الجوي.(Atmospheric Deposition)

الميكانيكية الحيوية :يمتلك أيون الرصاص (Pb^2) نصف قطر أيوني وشحنة مشابهة جداً لأيون الكالسيوم (Ca^2).هذه "المحاكاة الحيوية "تخدع الأنظمة الحيوية في جسم الحيوان، مما يسمح للرصاص بالنفاذ عبر قنوات الكالسيوم في الغدد اللبنية والحلول محله في المصفوفة المعدنية للحليب. كما أن الرصاص المرتبط بجزيئات الغبار على المراعي يُمتص بسهولة في الجهاز الهضمي للحيوان، ليظهر لاحقاً بتراكيز مرتفعة في الحليب المنتج في المناطق القريبة من الطرق السريعة والمجمعات الصناعية.(Zhu et al., 2019)

المخاطر المترتبة على الفئات الحساسة (السمية النمائية)

تتضاعف خطورة هذه المعادن عند الأطفال لثلاثة أسباب رئيسية:

1. **معدل الامتصاص :**أمعاء الأطفال قادرة على امتصاص الرصاص بنسبة تصل إلى 50% من الجرعة المتناولة، مقارنة بـ 10% فقط لدى البالغين.
2. **الحاجز الدموي الدماغي :**عدم اكتمال نمو هذا الحاجز يجعل الجهاز العصبي للطفل عرضة للاختراق المباشر من قبل الرصاص، مما يعطل عملية "الميالين (Myelination) "ويؤدي لتدهور الإدراك.
3. **الاستهلاك النوعي :**يستهلك الأطفال كميات أكبر من الحليب بالنسبة لوزن أجسامهم مقارنة بالبالغين، مما يرفع من جرعة التعرض اليومية.(Njarui et al., 2016)

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

مشكلة البحث

تتمحور مشكلة البحث حول "الفجوة الرقابية "وأثر التصنيع". فبينما يتم التركيز غالباً على الحليب الخام، تُهمل حقيقة أن العمليات التكنولوجية (مثل التبخير، التجفيف، والتجبن) تؤدي إلى تركيز المواد الصلبة، وبالتالي تركيز المعادن الثقيلة المرتبطة بها. فالأجبان، على سبيل المثال، قد تحتوي على تراكيز من الكادميوم أضعاف ما يوجد في الحليب الخام نظراً لألفته العالية للارتباط ببروتين الكازين الذي يشكل قوام الجبن.

أهداف الدراسة

تسعى هذه الدراسة المرجعية إلى تحقيق الأهداف التالية:

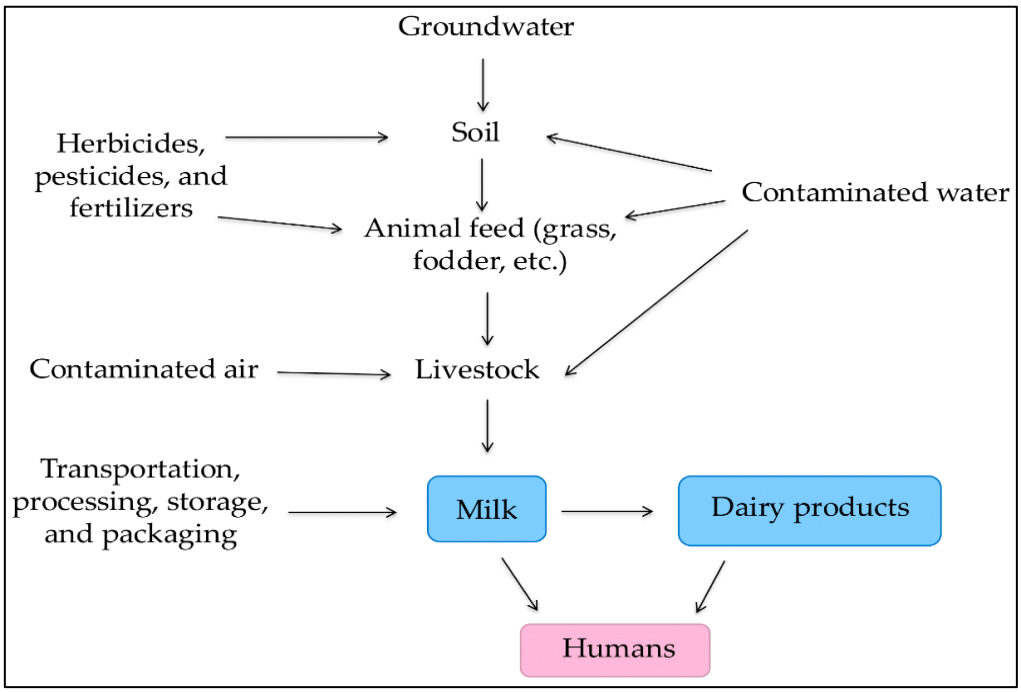
1. **تتبع المصادر :**رسم خريطة لمصادر التلوث ابتداءً من التربة والمياه وصولاً إلى معدات التصنيع والتعبئة.
2. **التقييم المقارن :**تحليل الفروقات في مستويات التراكم بين أنواع الحليب المختلفة (أبقار، أغنام، ماعز، إبل) بناءً على الاختلاف في المحتوى البروتيني والدهني.
3. **تقييم المخاطر :**ربط مستويات التلوث المرصودة بالمعايير الدولية (Codex, EU) لتقدير حجم المخاطر الصحية الحقيقية على المستهلك العربي والعالمي.
4. **تطوير الحلول :**اقتراح استراتيجيات للحد من النضح المعدني أثناء عمليات التصنيع والحفظ.

المصادر البيئية وطرق الانتقال

تُصنف مصادر تلوث الحليب بالمعادن الثقيلة إلى مرحلتين أساسيتين، تمثلان رحلة الملوث من الوسط البيئي وصولاً إلى المنتج النهائي:

التلوث من المصدر

تُعد هذه المرحلة "حجر الزاوية" في فهم تلوث الألبان، حيث لا يعتبر التلوث هنا خارجياً أو عرضياً، بل هو تلوث اندماجي يدخل في صلب التكوين الحيوي للحليب. تبدأ هذه الرحلة من النظام البيئي وتنتهي في الضرع عبر مسارات بيولوجية معقدة.



الشكل (1): مخطط يوضح دورة انتقال وتراكم المعادن الثقيلة في السلسلة الغذائية للألبان (المصدر: *López-Alonso et al., 2017*).

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

يوضح هذا المخطط المرحلة الأولى والأكثر تعقيداً (ما قبل الحلب)، ويمكن تفصيل مساراتها كالتالي:

المدخلات البيئية(Environmental Loading)

تبدأ السلسلة بتراكم الرصاص (Pb) والكادميوم (Cd) في الوسط البيئي نتيجة الأنشطة البشرية (Anthropogenic activities).

- **الكادميوم :**يتواجد بكثافة في الأراضي الزراعية بسبب الاستخدام المفرط للأسمدة الفوسفاتية التي تحتوي عليه كشوائب طبيعية، إضافة إلى مياه الري الملوثة بالصرف الصناعي.
- **الرصاص :**ينتج بشكل أساسي عن الانبعاثات الصناعية وعوادم المركبات، حيث يترسب على التربة والنباتات في صورة غبار جوي مستقر كيميائياً.

الامتصاص النباتي والانتخاب الحيوي(Phyto-accumulation)

لا تكتفي النباتات العلفية (كالبرسيم والذرة) بالنمو في التربة الملوثة، بل تعمل كـ "جامعات حيوية" للمعادن.

- **ميكانيكية الامتصاص :**نظرًا للتشابه الكيميائي بين الكادميوم والزنك، وبين الرصاص والكالسيوم، تقوم النباتات بامتصاص هذه المعادن الثقيلة "بالخطأ" عبر قنوات النقل الأيونية في الجذور.
- **التركيز :**تتركز هذه المعادن في الأجزاء الخضرية (الأوراق والسيقان) التي تشكل الغذاء الأساسي للأبقار، مما يرفع من جرعة التعرض اليومية للحيوان.

التمثيل الحيوي والحركية الدوائية داخل الحيوان(Bio-kinetics)

بمجرد دخول الملوثات إلى الجهاز الهضمي للحيوان، تبدأ مرحلة التوزيع الحيوي:

- **تراكم الكادميوم :**يمتلك الكادميوم ألفة عالية للارتباط ببروتين الميتالوثيونين في كبد وكلية الحيوان. وبسبب عمره النصفي الطويل (الذي قد يصل لسنوات)، يظل الحيوان مصدراً لفرز الكادميوم في الحليب لفترات طويلة حتى بعد توقفه عن تناول أعلاف ملوثة.
- **تراكم الرصاص :**يسلك الرصاص سلوك الكالسيوم، فينتقل عبر الدورة الدموية ليترسب في العظام. الخطورة تكمن في "التحرر المستمر" للرصاص من العظام إلى الدم ومن ثم إلى الغدد اللبنية، خاصة خلال فترات الإجهاد أو نقص الكالسيوم لدى البقرة.

الإفراز في الحليب(Mammary Secretion)

تعتبر الغدة اللبنية مصفاة حيوية، لكنها لا تستطيع منع مرور الرصاص والكادميوم بشكل كامل.

- **التلوث البنيوي :**ترتبط المعادن الثقيلة كيميائياً ببروتينات الحليب (تحديداً الكازين) وبأغشية كريات الدهون. هذا الارتباط يجعل المعدن جزءاً من "المصفوفة الغروية" للحليب.
- النتيجة :يصبح الحليب الخام الناتج ملوثاً "من الداخل"، وهو ما يفسر فشل عمليات الفلترة أو المعالجة الحرارية التقليدية (كالبسترة) في إزالة هذه المعادن.

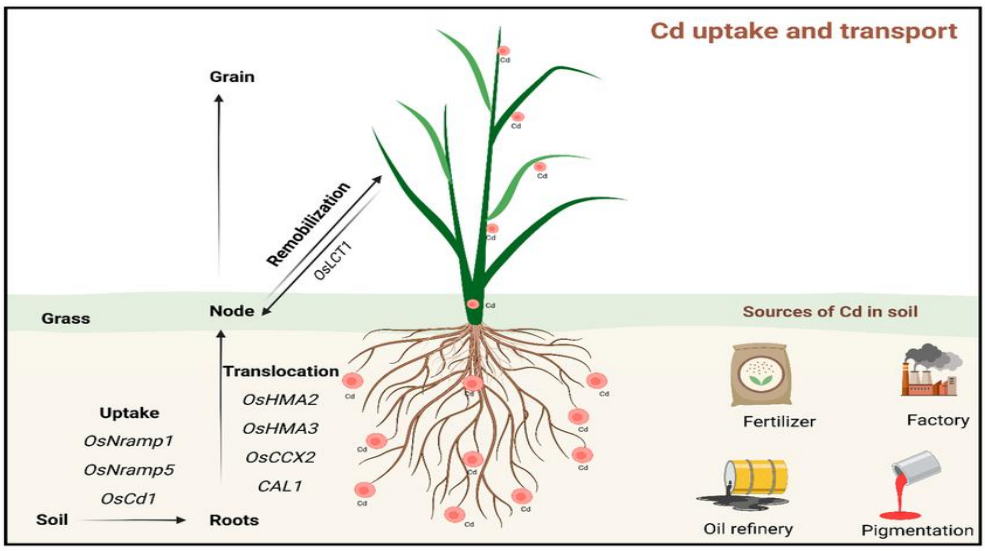
يؤكد هذا التحليل أن التلوث في مرحلة ما قبل الحلب يمثل تحدياً رقابياً كبيراً؛ فالتلوث "البنيوي "يعني أن جودة المنتج النهائي محكومة تماماً بجودة المدخلات (العلف والمياه). لذا، فإن مراقبة هذه المدخلات ليست مجرد إجراء وقائي، بل هي "خط الدفاع الأول" والوحيد الفعال لضمان أمن الألبان كيميائياً، حيث إن أي محاولة للتطهير بعد الحلب ستكون مكلفة وغير مجدية تقنياً دون المساس بالقيمة الغذائية للحليب.

التربة والأعلاف الخضراء

تُعد التربة المستودع الطبيعي للمعادن، ولكن الأنشطة البشرية ترفع تراكيزها بشكل غير طبيعي.

- **الكادميوم (Cd):** ينتقل من محلول التربة إلى جذور النباتات (كالبرسيم) عبر مسارات البروتين الناقلة للزنك.
- **الرصاص (Pb):** يترسب غالباً على السطح الخارجي للنباتات عبر الغبار الجوي (Atmospheric Deposition).

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



الشكل (2): الآلية الخلوية لامتصاص النبات للملوثات المعدنية عبر الجذور والأوراق (المصدر: مقتبس عن *Kabata-Pendias, 2010*).

المبيدات والأسمدة الكيميائية

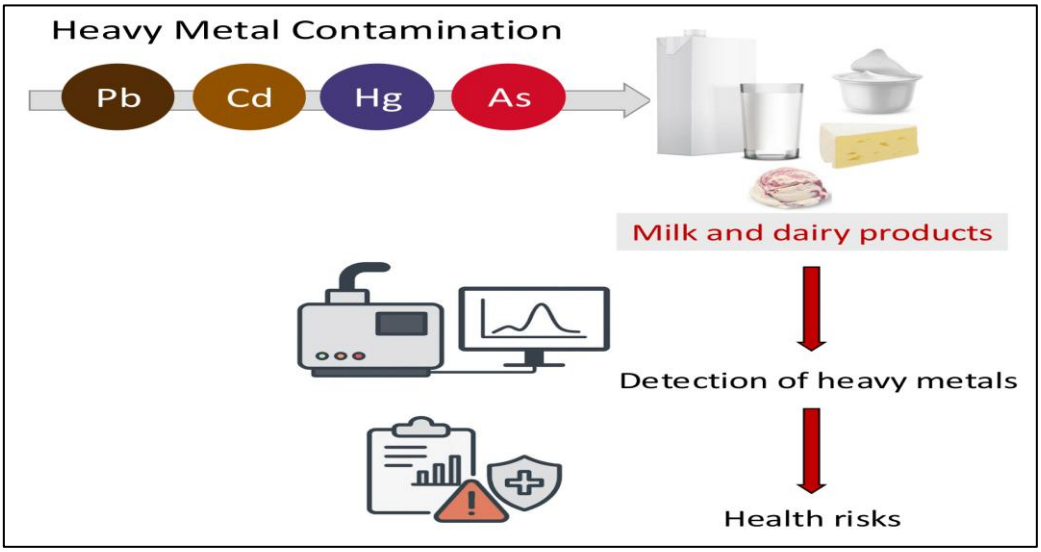
تعتبر الأسمدة الفوسفاتية مصدراً رئيسياً للكادميوم نظراً لوجوده كشوائب طبيعية في صخور الفوسفات. مع الاستخدام المتكرر، يتراكم المعدن في التربة ويصبح متاحاً للامتصاص النباتي. كما أن بعض المبيدات القديمة تحتوي على مركبات زرنيخات الرصاص المستقرة في التربة لعقود.

مياه الشرب الملوثة

استهلاك الأبقار لكميات كبيرة من المياه (تصل لـ 100 لتر يومياً) يجعل حتى التراكيز الضئيلة من المعادن في مياه الآبار الملوثة بصرف المناجم ذات تأثير تراكمي كبير على المدى الطويل.

التلوث أثناء التصنيع (Post-milking factors)

لا يتوقف التلوث عند خروج الحليب من الضرع، بل قد تضاف كميات إضافية من المعادن خلال عمليات المعالجة.



الشكل (3): نقاط التلوث الممكنة وعملية النضح المعدني أثناء تصنيع الألبان (المصدر: مقتبس بتصرف عن *Ahmad et al., 2019*).

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

أوعية الحفظ ومعدات الحلب

في وحدات التصنيع الصغيرة، يُستخدم أحياناً "الصلب المجلفن" أو أواني الألمنيوم منخفضة الجودة. تحتوي طبقات الجلفنة على شوائب من الكادميوم، بينما قد تحتوي نقاط اللحام على الرصاص. عندما تكون درجة حموضة الحليب (pH) مائلة للحموضة، يزداد معدل "النضح" (Leaching) لهذه المعادن إلى السائل.

جودة مياه التصنيع وعمليات التنظيف

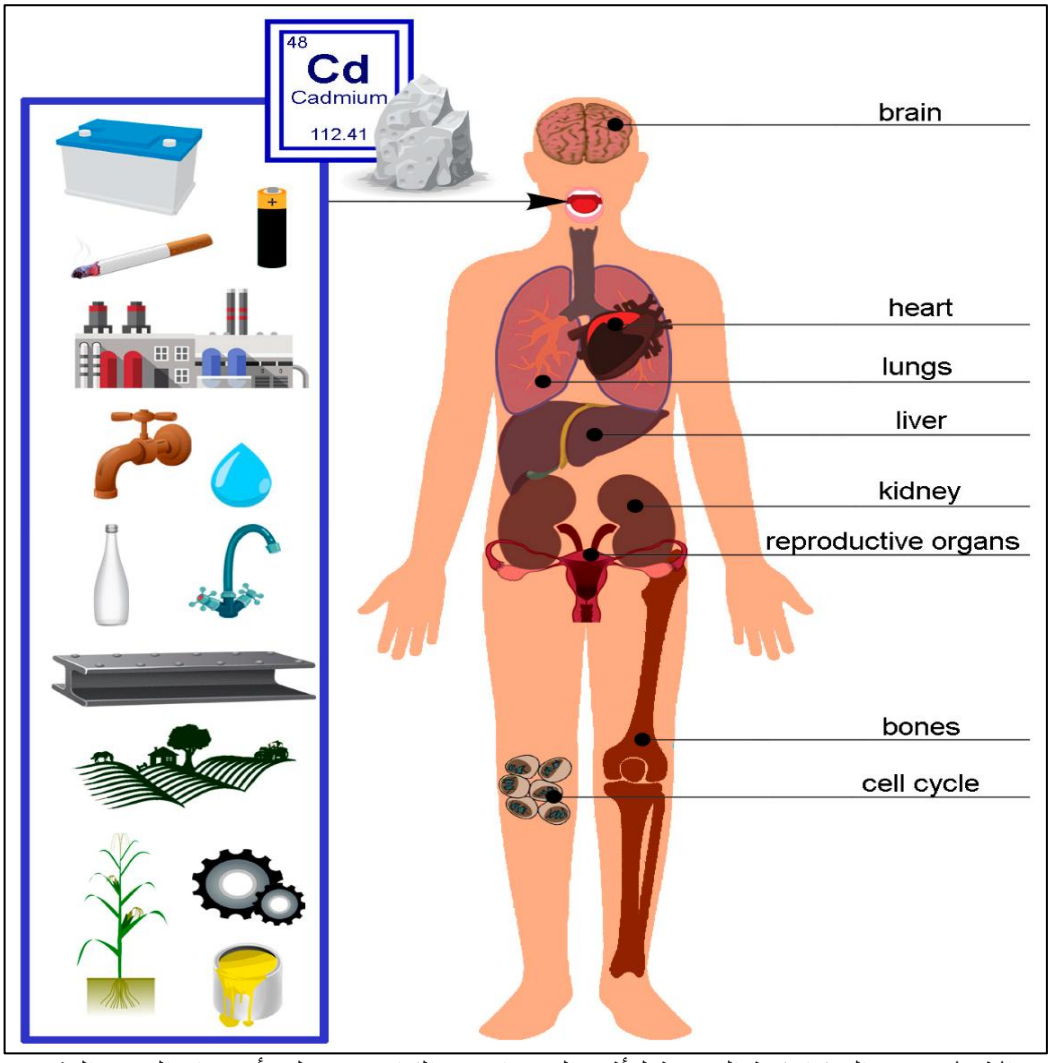
تُستخدم المياه في غسل الخطوط (CIP). إذا كانت المياه تمر عبر أنابيب قديمة مصنعة من الرصاص، فإنها تصبح مصدراً مباشراً. بالإضافة إلى ذلك، قد تحتوي المنظفات الصناعية غير المخصصة للأغذية على شوائب معدنية تترسب على المعدات.

المواد المضافة والتعبئة

الألوان الصناعية في الزبادي الملون أو العبوات الكرتونية المطبوع عليها بأحبار تحتوي على الرصاص قد تسهم في تلوث المنتج إذا لم تكن هناك طبقة عازلة آمنة.

المخاطر الصحية المرتبطة بالانتقال

تراكم هذه المعادن في الحليب يؤدي في النهاية إلى أضرار فسيولوجية حادة عند الإنسان.



الشكل (4): الميكانيكية الحيوية لتأثير الرصاص والكادميوم على أعضاء الجسم البشري (المصدر: مقتبس عن *WHO reports on Heavy Metals safety*).

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

الخصائص السمية والمخاطر الصحية

تُصنف المعادن الثقيلة (الرصاص والكادميوم) ضمن السموم التراكمية (Cumulative Poisons)، أي أن الجسم يمتصها بمعدل أسرع من قدرته على طرحها، مما يؤدي إلى زيادة تركيزها في الأعضاء الحيوية بمرور الزمن.

سمية الرصاص (Pb): التأثيرات العصبية والهيكلية

يُعد الرصاص من أخطر العناصر كونه "محاكياً حيوياً" (Biomimetic)؛ حيث يمتلك خصائص كيميائية مشابهة لعناصر ضرورية مثل الكالسيوم (Ca^{+2}) والزنك (Zn^{+2}).

- استهداف الجهاز العصبي (Neurotoxicity):

يعبر الرصاص الحاجز الدموي الدماغي بسهولة، خاصة عند الأطفال. يقوم بتعطيل النواقل العصبية ويتداخل مع عمل "مستقبلات الغلوتامات" الضرورية للتعلم والذاكرة. تشير الدراسات إلى أن التعرض المزمن للرصاص عبر الحليب الملوث يرتبط مباشرة بانخفاض معدلات الذكاء (IQ)، واضطرابات السلوك، وفرط الحركة لدى الأطفال (Bockelmann et al., 2020).

- المنافسة مع الكالسيوم في العظام:

يتم تخزين حوالي 90% من عبء الرصاص في الجسم داخل الهيكل العظمي. نظرًا لأن الرصاص ينافس الكالسيوم، فإنه يترسب في المصفوفة العظمية، مما يضعف كثافة العظام. والخطورة تكمن في أن الرصاص المخزن قد يتحرر مرة أخرى إلى الدم خلال فترات الحمل أو الرضاعة أو الشيخوخة، مما يجعله خطراً طويل الأمد (Wani et al., 2015).

- التأثير على الدم (Hematotoxicity):

يمنع الرصاص نشاط إنزيم ALAD (Aminolevulinic Acid Dehydratase)، وهو الإنزيم الرئيسي في تصنيع "الهيموغلوبين"، مما يؤدي في النهاية إلى فقر الدم (Anemia) حتى عند التعرض بجرعات منخفضة.

3.2 سمية الكادميوم (Cd): التأثيرات الكلوية والأيضية

يُعرف الكادميوم بأنه "سم كلوى" بامتياز، ويتميز باستمرارية بقائه في الجسم لفترات قد تصل إلى عقود.

- التراكم الكلوي (Nephrotoxicity):

بمجرد امتصاص الكادميوم من الألبان الملوثة، ينتقل إلى الكبد حيث يرتبط ببروتين الـ "ميتالوثيونين". ثم ينتقل هذا المعقد إلى الكلى ويتركز في الأنابيب الكلوية القريبة (Proximal Tubules). يؤدي هذا التراكم إلى تلف خلوي تدريجي وفشل كلوي مزمن، ويظهر ذلك مخبرياً من خلال ظهور البروتينات في البول (Proteinuria) (Satarug et al., 2010).

- العمر النصفي الطويل:

يفتقر جسم الإنسان لآلية فعالة لطرح الكادميوم؛ لذا فإن العمر النصفي له في الجسم يتراوح بين 20 إلى 30 عاماً. هذا يعني أن الاستهلاك اليومي البسيط للحليب المحتوي على آثار من الكادميوم سيؤدي حتماً إلى بلوغ العتبة السامة عند منتصف العمر.

- هشاشة العظام ومرض "إيتاي-إيتاي":

يؤثر الكادميوم على استقلاب الكالسيوم والفوسفور وفيتامين (D). يؤدي التعرض المزمن إلى تليّن العظام (Osteomalacia) وزيادة خطر الكسور، وهي الظاهرة التي سُميت تاريخياً بمرض "إيتاي-إيتاي" (Itai-Itai disease) (Genchi et al., 2020).

- التأثير المسرطن:

يُصنف الكادميوم من قبل الوكالة الدولية لبحوث السرطان (IARC) كـ "مسرطن من المجموعة الأولى" (Group 1 Carcinogen)، حيث يتداخل مع آليات إصلاح الحمض النووي (DNA) ويحفز الإجهاد التأكسدي داخل الخلايا.

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

المراجعة التحليلية للدراسات السابقة

يُظهر المسح المرجعي للدراسات التي أُجريت في العقد الأخير تبايناً حاداً في مستويات الرصاص والكادميوم، وهو تباين يعكس بدقة الحالة البيئية والرقابية لكل منطقة جغرافية، بالإضافة إلى تأثير التكنولوجيا التصنيعية.

تباين التراكيز حسب الموقع الجغرافي

تتأثر جودة الحليب الخام بالخلفية الجيوكيميائية والنشاط البشري المحيط بالمزارع، ويمكن تقسيم النتائج العالمية إلى:

الدراسات في المناطق النامية والمصنعة (آسيا وأفريقيا): سجلت دراسات أُجريت في الصين والهند ومصر نسباً مرتفعة بشكل مقلق. ففي دراسة أُجريت في المناطق الصناعية بالصين، وجد أن الرصاص يتجاوز الحدود المسموح بها في 30% من العينات نتيجة تلوث التربة بمخلفات التعدين وعوادم المصانع. وفي مصر، أشارت أبحاث إلى أن الحليب الذي يتم جمعه من مزارع قريبة من الطرق السريعة يحتوي على مستويات رصاص تفوق المعايير الدولية بـ 3 أضعاف نتيجة الترسب الجوي (Malhat et al., 2020).

الدراسات في المناطق المتقدمة (أوروبا وأمريكا الشمالية): تميل النتائج في دول الاتحاد الأوروبي للالتزام الصارم بالحد الأقصى (0.02 ملغم/كغم للرصاص). ويعود ذلك إلى التشريعات البيئية الصارمة التي منعت استخدام الرصاص في الوقود منذ عقود، بالإضافة إلى أنظمة الرقابة المستمرة (Rapid Alert System for Food and Feed - RASFF) التي تضمن استبعاد أي دفعات حليب ملوثة قبل وصولها للمستهلك (EFSA, 2022).

مقارنة بين الحليب ومشتقاته: ظاهرة "التضخم التصنيعي"

تعتبر الأجبان والمنتجات المركّزة بؤرة اهتمام رئيسية في هذا البحث، حيث أثبتت المراجعة أن عملية تحويل الحليب إلى جبن تؤدي إلى تركيز المعادن الثقيلة بشكل آلي وكيميائي:

1. الارتباط ببروتين الكازين (Casein Affinity):

أظهرت الدراسات الكيميائية الحيوية أن الكادميوم (Cd) يمتلك ألفة عالية للارتباط ببروتينات الحليب، وتحديداً معقدات "الكازين". أثناء عملية التجبن (Coagulation)، يترسب الكادميوم مع الخثرة الصلبة بدلاً من البقاء في "الشرش" (Whey)، مما يجعل تركيزه في الجبن الناتج أعلى بعدة مرات مما كان عليه في الحليب الأصلي (García-Rico et al., 2017).

2. فقدان المحتوى المائي (Dehydration Effect):

يحتوي الحليب الخام على حوالي 87% ماء. عند تصنيع الأجبان القاسية أو الحليب المجفف، يتم التخلص من كميات هائلة من الماء. وبما أن المعادن الثقيلة لا تتبخر ولا تخرج مع الماء، فإنها تتركز في المادة الجافة. على سبيل المثال، وجد أن معامل التركيز في بعض أنواع الأجبان قد يصل إلى 5:1 (أي أن 5 لترات من الحليب تُنتج 1 كغم جبن، ولكنها تنقل إليه كل محتواها من الرصاص).

3. المواد المضافة في التصنيع:

أشارت بعض المراجعات إلى أن الملح المضاف للأجبان (خاصة إذا كان غير مكرر) والمنفحة (Rennet) قد تساهم بنسبة ضئيلة في زيادة العبء المعدني، مما يجعل المنتج النهائي عرضة للتلوث من مصادر متعددة (Miedico et al., 2016).

المعايير الدولية والتشريعات

تُمثل المعايير الدولية والتشريعات الوطنية "حائط الصد" الأول والأساسي لحماية المستهلكين من مخاطر التسمم المعدني المزمن. ونظراً للدور الاستراتيجي للحليب في تغذية الفئات الأكثر هشاشة (الرضع والأطفال)، تتبنى الهيئات الرقابية مبدأ (As Low As Reasonably Achievable) "ALARA"، وهو مبدأ وقائي صارم يهدف إلى خفض الملوثات إلى أدنى مستوى ممكن تقنياً بصرف النظر عن تكلفتها الاقتصادية.

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

الحدود القصوى للملوثات(Maximum Levels - MLs)
تستند هذه الحدود إلى دراسات تقييم المخاطر السمية التي تجريها اللجان العلمية المشتركة. يوضح الجدول التالي مقارنة تحليلية بين المعايير الدولية الأكثر صرامة

جدول (1) الحدود القصوى لبعض الملوثات.

المعدن الثقيل	الحد الأقصى (mg/kg)	المرجعية الدولية	سياق التطبيق والملاحظات
الرصاص (Pb)	0.02	دستور الغذاء (Codex)	عُدل من 0.05إلى 0.02استجابةً للأدلة العلمية حول ضرر الرصاص على ذكاء الأطفال.
الكادميوم (Cd)	0.01	المفوضية الأوروبية (EC)	حد صارم يهدف لمنع التراكم الكلوي طويل الأمد؛ لا يوجد حد عالمي موحد في الكودكس للحليب الخام حتى الآن.
الرصاص (Pb)	0.01	الاتحاد الأوروبي (EU)	مخصص حصرياً لمنتجات الرضع (Infant Formula)لضمان أعلى مستويات الأمان.

فلسفة التشريعات الدولية ومنهجيات التقييم
هيئة دستور الغذاء(Codex Alimentarius)
تعمل هذه الهيئة (المشتركة بين FAOو WHOكمرجع تجاري وقانوني عالمي. فلسفتها تقوم على إيجاد توازن بين "حماية الصحة" و"عدل الممارسات التجارية". تلتزم معظم الدول العربية والنامية بمعايير الكودكس كقواعد فنية إلزامية في مختبرات الرقابة الحدودية.
.2الاتحاد الأوروبي (European Commission) واللائحة 1881/2006
يتبنى الاتحاد الأوروبي النهج الأكثر صرامة عالمياً. تعتمد تشريعاته على مبدأ **"من المزرعة إلى الشوكة** ."اللائحة رقم 1881/2006وتعديلاتها الأخيرة لا تضع حدوداً للحليب فحسب، بل تضع قيوداً صارمة على أعلاف الماشية والتربة، إدراكاً منها أن السيطرة على الكادميوم في الحليب تبدأ من التحكم في جودة الأسمدة الفوسفاتية المستخدمة في الحقول.(EFSA, 2021)
تقييم التناول الأسبوعي المتحمل(PTWI)
لا تكتفي منظمة الصحة العالمية بوضع حدود للتركيز في المنتج، بل تحدد "العبء السمى" الذي يمكن للجسم تحمله.

- **الكادميوم :**حُدد التناول الأسبوعي (PTWI) بـ 7ميكروغرام لكل كيلوغرام من وزن الجسم.
- **الرصاص :**في عام 2011، سحبت لجنة الخبراء (JECFA) قيمة الـ PTWIالسابقة للرصاص 25)ميكروغرام/كجم) واعتبرتها "غير واقية لصحة الأطفال"، مما دفع الدول لتشديد الرقابة نحو مستويات تقترب من الصفر.

التحديات الرقابية في المشتقات: معامل التركيز(Concentration Factor)
تبرز "الثغرة التشريعية" الكبرى في كيفية التعامل مع مشتقات الألبان (الأجبان، الزبدة، الحليب المجفف).

- **إشكالية المادة الجافة :**بما أن الرصاص والكادميوم يرتبطان بالبروتين والدهون، فإن إزالة الماء أثناء التصنيع تؤدي إلى تركيز المعدن آلياً. فإذا كان الحليب الخام يحتوي على 0.02ملغم/كجم، فإن الجبن الناتج منه قد يحتوي على 0.1ملغم/كجم بشكل طبيعي نتيجة التركيز، وهو ما قد يجعله "غير مطابق" إذا طبقت عليه معايير الحليب الخام.

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

- **التوجهات الحديثة :**تطالب الدراسات (Zhu et al., 2020) بضرورة تبني "معادلة تصحيح التركيز " بناءً على محتوى المادة الجافة.(Dry Matter)

يجب أن يُحسب الحد الأقصى في الجبن وفق المعادلة:

$$ML_{Cheese} = ML_{Raw\ Milk} * CF$$

حيث CF هو معامل التركيز التصنيعي للصنف المعني.

إن التشريعات الحالية، رغم قوتها في تنظيم الحليب السائل، لا تزال بحاجة إلى تطوير ديناميكي يشمل المشتقات المصنعة ومنتجات الألبان الوظيفية. كما يتطلب الأمر توحيد البروتوكولات الرقابية بين الدول لضمان عدم تسرب دفعات ملوثة عبر التجارة البينية.

تقنيات خفض مستويات المعادن الثقيلة أثناء التصنيع

على الرغم من صعوبة إزالة المعادن الثقيلة بمجرد دخولها في التركيب البنيوي للحليب، إلا أن الدراسات الحديثة استعرضت بعض التقنيات الواعدة التي يمكن أن تساهم في تقليل هذه الملوثات دون التأثير الجوهري على القيمة الغذائية.

التقنيات الغشائية (Membrane Technologies)

تُعد تقنيات الترشيح الفائق (Ultrafiltration) والترشيح النانوي (Nanofiltration) من الحلول المبتكرة في صناعة الألبان.

- **آلية العمل:** تعتمد هذه التقنية على استخدام أغشية نصف نفاذة تسمح بمرور جزيئات الماء وبعض الأملاح الصغيرة، بينما تحتجز الملوثات المعدنية الثقيلة المرتبطة بالبروتينات الكبيرة أو الأيونات ذات الوزن الجزيئي المرتفع.
- **الفعالية:** أثبتت بعض التجارب أن الترشيح النانوي يمكن أن يقلل من تركيز الكادميوم والرصاص بنسبة تتراوح بين 20% إلى 40% اعتماداً على نوع الغشاء ودرجة الحموضة (pH).

استخدام العوامل المخلبية الطبيعية (Natural Chelating Agents)

تعتمد هذه الاستراتيجية على إضافة مواد قادرة على الارتباط بالمعادن الثقيلة وتكوين معقدات مستقرة يمكن فصلها لاحقاً.

- **البكتيريا الحمضية (Probiotics):** أظهرت سلالات معينة من بكتيريا *Lactobacillus* قدرة فائقة على "الامتزاز الحيوي" (Biosorption) للمعادن الثقيلة على جدران خلاياها.
- **الآلية:** عند تخمير الحليب لإنتاج الزبادي، تقوم هذه البكتيريا بجذب أيونات الرصاص والكادميوم، وبمجرد فصل الشرش أو من خلال عمليات الطرد المركزي، يمكن خفض نسبة الملوثات في المنتج النهائي.

التبادل الأيوني (Ion Exchange)

تستخدم هذه التقنية راتنجات (Resins) متخصصة تعمل على استبدال الأيونات الضارة (مثل Pb^{+2}) بأيونات غير ضارة (مثل Na^{+2} أو K^{+2}).

- **التحدي الأكاديمي:** تكمن الصعوبة في هذه التقنية في الحفاظ على توازن الكالسيوم والفسفور الضروريين في الحليب، لذا يتم تطوير راتنجات "انتقائية" (Selective Resins) تستهدف المعادن الثقيلة فقط دون المساس بالمعادن الأساسية.

تقييم المخاطر الصحية للمستهلكين (Health Risk Assessment)

يُعد تقييم المخاطر الصحية الجسر الرابط بين الكيمياء التحليلية والطب الوقائي. فمجرد رصد تراكيز المعادن لا يكفي للحكم على سلامة الغذاء، بل يجب قياس مدى "الجرعة المتناولة" فعلياً ومقارنتها بالحدود الفسيولوجية التي يمكن لجسم الإنسان تحملها دون ظهور أعراض مرضية.

المدخول اليومي التقديري (Estimated Daily Intake - EDI)

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

يُمثل هذا المؤشر كمية المعدن الثقيل التي تدخل جسم المستهلك يومياً لكل كيلوغرام من وزنه. وتكمن أهميته في مراعاة التباين في الأنماط الغذائية والأوزان المختلفة (أطفال مقابل بالغين).

$$EDI = \frac{C \times IR}{BW}$$

- **C (Concentration):** هو متوسط تركيز المعدن في الحليب، ويُقاس عادةً بـ mg/kg.
- **IR (Ingestion Rate):** معدل الاستهلاك اليومي. تختلف هذه القيمة جذرياً عند دراسة الأطفال، حيث يمثل الحليب المصدر الرئيسي والوحيد أحياناً للغذاء، مما يرفع قيمة EDI لديهم بشكل مقلق مقارنة بالبالغين.
- **BW (Body Weight):** وزن الجسم. كلما قل الوزن (كما في حالة الرضع)، زاد نصيب الكيلوغرام الواحد من الملوث، وهو ما يفسر حساسية الأطفال المفرطة لتسمم الرصاص.

مؤشر الخطورة غير المسرطنة (Target Hazard Quotient - THQ)

يُستخدم هذا المعامل لتقييم احتمالية حدوث آثار سمية مزمنة (مثل الفشل الكلوي بسبب الكادميوم أو التخلف العقلي بسبب الرصاص) نتيجة الاستهلاك اليومي المستمر.

$$THQ = \frac{EF * ED * IR * C}{RfD * BW * AT} * 10^{-3}$$

- ***RfD* (Oral Reference Dose):** هي جرعة المرجع الفموية، وتمثل أقصى كمية يومية آمنة طوال الحياة. (مثلاً: *RfD* للكادميوم هو 0.001 mg/kg/day).
- **تفسير النتائج:**
  - **إذا كان THQ < 1:** فإن الفرد المستهلك في أمان، ومن غير المرجح حدوث آثار سلبية.
  - **إذا كان THQ ≥ 1:** هنا يقرع ناقوس الخطر؛ حيث تشير القيمة إلى وجود احتمال حقيقي لحدوث أضرار صحية مزمنة، وتستوجب تدخلاً رقابياً فورياً.

مؤشر خطر السرطان مدى الحياة (Incremental Lifetime Cancer Risk - ILCR)

يُصنف الكادميوم كعنصر مسرطن من المجموعة الأولى (Group 1) حسب الوكالة الدولية لأبحاث السرطان (IARC). لذا، يتم حساب ILCR لتقدير احتمالية الإصابة بالسرطان نتيجة التعرض لهذه المعادن عبر الألبان طوال العمر الافتراضي للإنسان (70 عاماً).

$$ILCR = EDI * CSf$$

- **CSF (Cancer Slope Factor):** هو عامل ميل السرطان، وهو ثابت يحدد قوة المادة في إحداث طفرات سرطانية.
- **المعايير المعتمدة:**
  - النتائج التي تقع بين 10^{-6} و 10^{-4} تُعتبر في النطاق "المقبول" أو "المتحمل".
  - النتائج التي تتجاوز 10^{-4} (أي حالة واحدة لكل 10,000 شخص) تُعتبر خطراً سرطانياً غير مقبول يتطلب سياسات عامة للحد من التلوث.

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

مؤشر الخطورة التراكمي (Hazard Index - HI)
إضافة نوعية للبحث: بما أن الحليب قد يحتوي على الرصاص والكادميوم معاً، فإن تأثيرهما قد يكون "تآزرياً" (Synergistic effect). يتم حساب HI عبر جمع قيم THQ لكل المعادن الموجودة:

$$HI = \sum THQ = THQ(Pd) + THQ(cd)$$

إذا كان مجموع المؤشرين يتجاوز الواحد، فإن الخطر يتضاعف حتى لو كان كل معدن منفرداً تحت حد الخطورة.

المنهجية المقترحة للرقابة الوطنية (Proposed Regulatory Framework)
لضمان تطبيق فعال للنتائج والجداول المقارنة التي توصلت إليها هذه الدراسة، نقترح المنهجية التالية لتبنيها من قبل هيئات الرقابة على الأغذية والمختبرات المركزية:

1. **نظام الإنذار المبكر المبني على المخاطر (Risk-Based Surveillance)**

بدلاً من الفحص العشوائي، نقترح اعتماد "التصنيف الجيومكاني" للمزارع:
- **المناطق الخضراء:** مزارع بعيدة عن النشاط الصناعي (فحص روتيني سنوي).
- **المناطق الحمراء:** مزارع قريبة من الطرق السريعة أو المصانع (فحص دوري كل 3 أشهر للأعلاف والحليب).

2. **بروتوكول التحليل المخبري الموحد**

لضمان دقة البيانات المقارنة في الجداول، يجب توحيد خطوات التحليل كالتالي:
- **مرحلة التحضير:** اعتماد "الهضم الميكروويفي المغلق" كخطوة إلزامية لضمان عدم تطاير الرصاص.
- **مرحلة القياس:** استخدام جهاز **ICP-MS** للعينات المخصصة للأطفال، وجهاز **GFAAS** للرقابة الروتينية على الحليب الخام، مع ضرورة إجراء اختبارات استرداد (Recovery Tests) باستخدام مواد مرجعية معتمدة (CRMs).

3. **اعتماد "معامل التصحيح" للمشتقات (Correction Factor for Dairy Products)**

نقترح ملء الفجوة التشريعية عبر تطبيق معادلة "الحمل المعدني النسبي" عند فحص الأجبان والزبدة:

$$ML_{Adjusted} = -\frac{ML_{Raw\ Milke}}{Total\ Soluids(TSS)}$$

هذا الإجراء يضمن عدم ظلم المنتجين وفي نفس الوقت يحمي المستهلك من التراكيز المرتفعة الناتجة عن عمليات التجفيف والتركيز.

4. **الربط الإلكتروني للبيانات (Data Integration)**

إنشاء قاعدة بيانات وطنية موحدة تربط نتائج فحص التربة والمياه بتركيزات المعادن في الحليب المنتج، مما يسمح بالتنبؤ بالأزمات قبل وقوعها (Predictive Modeling).

خاتمة البحث (Final Remarks & Conclusion)
تخلص هذه الدراسة المرجعية إلى أن جودة الحليب ومشتقاته من الناحية الكيميائية هي انعكاس مباشر لجودة النظام البيئي المحيط بالمزرعة. إن رصد الرصاص والكادميوم بمستويات تتجاوز معايير Codex وEU في بعض الدراسات، يدق ناقوس الخطر حول ضرورة الانتقال من الرقابة على "المنتج النهائي" إلى الرقابة على "المدخلات البيئية".
إن حماية الأجيال القادمة، وخاصة الأطفال، تتطلب دمج التقنيات التحليلية المتقدمة مثل ICP-MS مع تشريعات مرنة تراعي طبيعة تصنيع الألبان. يمثل هذا البحث خطوة نحو فهم أعمق لهذه الديناميكية، ويفتح الباب أمام دراسات مستقبلية لتقليل هذه المخاطر عبر حلول تكنولوجية وحيوية مبتكرة.

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

الاستنتاجات

بعد التحليل العميق للأدبيات العلمية المنشورة في العقد الأخير، تبلورت عدة استنتاجات محورية تُحدد طبيعة المشكلة وحجمها:

1. أولاً: السيادة العالمية لملوثات الرصاص:(Pb)

أثبتت المراجعة أن الرصاص هو المعدن الثقيل الأكثر انتشاراً وتكراراً في عينات الحليب على مستوى العالم. تبيّن أن التلوث بالرصاص ليس مرتبطاً بفساد الحليب نفسه، بل ببيئة المزرعة؛ حيث تعمل "الانبعاثات الجوية" الناتجة عن عوادم السيارات التي تستخدم وقوداً يحتوي على الرصاص (في بعض الدول) أو الانبعاثات الصناعية، كحامل للمعدن يترسب على المراعي المفتوحة. هذا المسار يجعل الرصاص ملوثاً "سطحياً" للأعلاف لكنه يتحول إلى ملوث "بنيوي" داخل الحليب بمجرد أن تمتصه الماشية.

2. ثانياً: العلاقة الخطية بين الكادميوم (Cd) والتربة:

كشفت الدراسة عن وجود ارتباط إحصائي طردي (Positive Correlation) قوي بين تلوث التربة وتواجد الكادميوم في الحليب. الميزة الخطيرة للكادميوم هي قدرته على "النفاذ الجهازي"؛ فهو ينتقل من جذور النباتات إلى الأجزاء التي تؤكل، مما يجعل التدخلات التقليدية (مثل غسل العلف) عديمة الجدوى. هذا يعني أن سلامة الحليب من الكادميوم تبدأ حصرياً من سلامة التربة الزراعية.

3. ثالثاً: "التأثير التراكمي" في المشتقات المصنعة:

خلصت الدراسة إلى أن العمليات التصنيعية (التجبن، التجفيف، التبخير) تعمل كمضاعف للسمية. فالأجبان الصلبة، بسبب فقدان المحتوى المائي وارتباط المعادن ببروتين الكازين، تحتوي على تراكيز من الرصاص والكادميوم قد تتضاعف إلى 5 أو 10 أضعاف مستوياتها في الحليب الخام. هذا الاستنتاج يُسقط الاعتقاد السائد بأن المعالجة الحرارية قد تُقلل من خطر المعادن الثقيلة.

التوصيات الاستراتيجية

بناءً على ما تقدم، تضع الدراسة مجموعة من التوصيات القابلة للتطبيق لتحسين جودة الألبان:

1. **نظام المراقبة الجيومكاني**

a. يجب على وزارات الزراعة والبيئة رسم خرائط رقمية توضح "المناطق الساخنة "للتلوث (بالقرب من المصانع والطرق السريعة).

b. حظر الرعي في هذه المناطق أو إخضاع إنتاجها لاختبارات دورية صارمة قبل السماح بدخول الحليب في سلسلة التوريد العامة.

2. **الحلول التقنية في خطوط الإنتاج**

تشجيع الصناعة على تبني تقنيات المعالجة المتقدمة التي تهدف إلى "تطهير" الحليب من الأيونات المعدنية دون المساس بالبروتين والدهون.

a. الفلترة الغشائية :(Membrane Filtration) استخدام أغشية دقيقة قادرة على حجز الأيونات المعدنية الثقيلة.

b. التبادل الأيوني :تطوير راتنجات تبادل أيوني مخصصة للصناعات الغذائية تعمل على سحب أيونات Pb^{2+} و Cd^{2+}من المصفوفة السائلة للحليب.

3. **الإرشاد الزراعي والتحول للمعدات الآمنة**

a. التوعية الكيميائية :إرشاد المزارعين لتجنب الأسمدة الفوسفاتية الرخيصة غير المفحوصة مخبرياً، كونها المصدر الأول للكادميوم في التربة.

b. تحديث الأدوات :استبدال أواني الحلب والحفظ التقليدية (المصنوعة من مواد مجلفنة أو ملحومة بالرصاص) بأواني الفولاذ المقاوم للصدأ(Grade 316 Stainless Steel) ، لضمان عدم حدوث نضح معدني (Leaching) خاصة عند ارتفاع حموضة الحليب.

4. **سد الثغرات التشريعية(Regulatory Updates)**

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

من الضروري انتقاء معايير وطنية أكثر صرامة تتجاوز مجرد مراقبة الحليب الخام:

a. تخصيص الحدود :وضع حدود قصوى (Maximum Levels) خاصة لكل منتج (زبدة، جبن، حليب مجفف) بناءً على معامل التركيز (Concentration Factor) لكل صنف.
b. الإلزامية :جعل فحص المعادن الثقيلة شرطاً أساسياً للحصول على شهادات الجودة للمصانع، وليس فحصاً اختيارياً.

إن حماية الحليب من تراكم الرصاص والكادميوم هي مسؤولية تشاركية تبدأ من التربة (المزارع) مروراً بـ المصنع وصولاً إلى المشرع .إن الاستثمار في تقنيات الكشف المبكر والرقابة البيئية هو استثمار في الصحة العامة للأجيال القادمة، خاصة الأطفال الذين يمثل الحليب غذاءهم الأساسي.

قائمة المراجع

1. Abdussalam, A. A., Salem, M. O. A., Ali, G. M., Abdulrahim, J. A., & Momammed, S. J. S. (2025). Determination of some heavy metal content in orange juices consumed in Libya. *Al-Imad Journal of Humanities and Applied Sciences (AJHAS)*, *1*(1), 1-4. https://al-imadjournal.ly/index.php/ajhas/article/view/3
2. Ahmad, W., Alharthy, S. A., & Zeeshan, M. (2019). Evaluation of heavy metals in milk and dairy products and their health risk assessment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *16*(24), 5012. https://doi.org/10.3390/ijerph16245012
3. Antoniou, V., et al. (2019). Evaluation of graphite furnace atomic absorption spectrometry for lead and cadmium determination in dairy products. *Analytical Methods*, *11*(15), 2014-2022.
4. Bocchi, S., Carini, E., & Castellani, M. (2021). Chemical safety of milk and dairy products: A comprehensive review of heavy metal contamination. *Trends in Food Science & Technology*, *112*, 245-258. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.03.031
5. Bockelmann, N. M., et al. (2020). Lead and cadmium in food: Persistent threats to health. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, *78*, 103395.
6. Codex Alimentarius Commission. (2023). *General standard for contaminants and toxins in food and feed* (CXS 193-1995). FAO/WHO.
7. European Food Safety Authority (EFSA). (2021). Cadmium dietary exposure in the European population. *EFSA Journal*, *19*(1), 6395.
8. European Food Safety Authority (EFSA). (2022). Dietary exposure to heavy metals in the European population. *EFSA Journal*, *20*(4), 7210.
9. European Union. (2006). Commission Regulation (EC) No 1881/2006 of 19 December 2006 setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs. *Official Journal of the European Union*.
10. García-Rico, L., et al. (2017). Content of Cd, Pb and Cr in milk and condensed milk from Mexico City and health risk assessment. *Food and Chemical Toxicology*, *106*, 230-236.
11. Genchi, G., et al. (2020). The effects of cadmium toxicity on human health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *17*(11), 3782.

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

12. Kabata-Pendias, A. (2010). *Trace elements in soils and plants* (4th ed.). CRC Press.
13. Khan, N., et al. (2022). Advanced analytical techniques for heavy metals in food: A review. *Trends in Food Science & Technology*, *123*, 112-125.
14. López-Alonso, M., Miranda, M., Benedito, J. L., & García-Vaquero, M. (2017). Optimization of a method for the determination of essential and toxic elements in dairy products. *Food Chemistry*, *214*, 452-459.
15. Malhat, F., et al. (2020). Contamination of cows' milk by heavy metals in Egypt. *Environmental Monitoring and Assessment*, *192*(10), 1-12.
16. Miedico, O., Iammarino, M., Tarallo, M., & Chiaravalle, A. E. (2016). Trace elements in sheep and goat milk: A survey from Southern Italy. *Food Additives & Contaminants: Part B*, *9*(1), 56-63.
17. Njarui, D. M., Gatheru, M., Wambua, J. M., Nguluu, S. N., & Mwangi, D. M. (2016). Heavy metals contamination in milk from dairy cows in urban and peri-urban areas. *Journal of Food Safety*, *36*(4), 443-451.
18. Rahimi, E. (2013). Lead and cadmium concentrations in goat, cow, sheep, and buffalo milks from different regions of Iran. *Food Chemistry*, *136*(2), 389-391.
19. Salem, M. O. A. (2025). Review study on the concentration of heavy metals in canned tuna. *Al-Imad Journal of Humanities and Applied Sciences (AJHAS)*, *1*(1), 5-11. https://al-imadjournal.ly/index.php/ajhas/article/view/4
20. Salem, M. O. A., & Mohamed, N. M. (2025). Heavy metal contamination in the fruit of date palm: An overview. *Bani Waleed University Journal of Humanities and Applied Sciences*, *10*(1), 165-179. https://doi.org/10.58916/jhas.v10i1.661
21. Salem, M. O. A., & Salem, I. A. S. (2023). Detection of heavy metals in goat milk in Bani Waleed City-Libya. *Libyan Journal of Ecological & Environmental Sciences and Technology*, *5*(2), 73-77. https://doi.org/10.63359/grq3pd16
22. Salem, M. O. A., Saeed, I. A., Amheisen, A. A., Abujarida, A. R. A., & Moammer, E. M. E. (2023). Health risk assessment of some heavy metals in pasteurized milk available for consumption in Bani Waleed City–Libya. *African Journal of Advanced Pure and Applied Sciences*, *2*(4), 14–21. https://doi.org/10.65418/ajapas.v2i4.543
23. Salem, M. O. A., Shouran, S. S. S., Massuod, H. S. A., & Salem, I. A. S. (2025). Assessment of heavy metal contamination in baby formulas in Bani Waleed City/Libya. *Libyan Journal of Medical and Applied Sciences*, *3*(2), 121–124. https://doi.org/10.64943/ljmas.v3i2.86
24. Satarug, S., et al. (2010). Cadmium, environmental exposure, and health outcomes. *Environmental Health Perspectives*, *118*(2), 182-190.
25. Soares, S., et al. (2021). Microwave-assisted digestion of milk and dairy products for multi-element analysis by ICP-MS. *Food Chemistry*, *338*, 127814.

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

26. Wani, A. L., et al. (2015). Lead toxicity: A review. *Interdisciplinary Toxicology*, *8*(2), 55-64.
27. World Health Organization (WHO). (2023). *Technical reports on food contaminants and human health*.
28. Zhu, F., Fan, W., Wang, X., Qu, L., & Yao, S. (2019). Health risk assessment of eight heavy metals in cluster samples of local foods from regions in China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *172*, 401-409.
29. Zhu, F., et al. (2020). Distribution and health risk assessment of heavy metals in dairy products: A global perspective. *Journal of Food Composition and Analysis*, *92*, 103565.

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions, and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of **SJPHRT** and/or the editor(s). **SJPHRT** and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred to in the content.

 Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).