

Renewable energy and the risks of lithium batteries: An analytical study of the challenges of hazardous waste management and their implications for environmental sustainability

Naghm H. Naama¹, Karrar A. Abd^{2*}

^{1,2}Department of investment and business management economics, College of business economics, Al-Nahrain University, Baghdad, Iraq

naghmalnama@gmail.com , Karar.azez15@gmail.com

Article information:

Received: 31–08–2025

Revised: 05–09– 2025

Accepted: 20–09– 2025

Published: 25–12– 2025

***Corresponding author:**

Karrar A. Abd

Karar.azez15@gmail.com



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](#).

Abstract:

The research **aims** to analyze the **complex paradox** between the necessity of expanding the use of **clean and renewable energy sources** as a primary objective of sustainable development, and the **inherent risks** associated with using **lithium-ion batteries** (LiBs) as high-reliability and high-efficiency energy storage devices, given the intermittent nature of renewable energy sources. The **research problem** was summarized by assessing the capacity and flexibility of international measures and policies aimed at achieving sustainable development in confronting the inherent risks and challenges arising from the use of these batteries. The most prominent **findings** indicated a significant and growing negative impact on the **(social, environmental, and economic)** advantages achieved by expanding clean and renewable energy production. Consequently, there are negative repercussions on the **(economic, social, and environmental) dimensions** of the sustainable development process. The most important **recommendations** strongly emphasized the necessity of **enacting legislation** to regulate the management of this type of **hazardous waste**. Furthermore, they stressed the need for adequate support from **stakeholders**, particularly **producers**, to ensure that the current poor regulation and management of these practices do not cast their **heavy shadow** onto **governments** in the future, compelling them to deal with the resulting crises.

Keywords: Sustainable development, renewable energy, clean energy transition.

Conclusions:

1. Every increase in the expansion toward the clean and renewable energy market is accompanied by a noticeable increase in the use of lithium batteries.
2. Thermal runaway represents the primary hazard of lithium-ion batteries, as it results from chemical reactions triggered by certain operational and chemical factors such as aging and manufacturing defects.
3. The process of thermal failure is accompanied by the emission of flammable gases (carbon monoxide and hydrogen), thereby increasing the likelihood of fires and explosions.
4. Most incidents associated with the use of lithium batteries are attributed to the failure of regulatory procedures related to proper packaging, adequate labeling, and their classification as hazardous materials.
5. The weak implementation of effective and binding Extended Producer Responsibility (EPR) mechanisms in most legislations is among the main reasons for reaching high levels of hazardous waste from lithium batteries. This situation constitutes a (deferred) environmental liability that reduces the environmental benefits resulting from the use of renewable energy sources.
6. The market cost of lithium batteries (within the clean and renewable energy sector) does not reflect the true cost of their entire life cycle, as it fails to account for the costs of containment, safety, safe disposal, and recycling. This may represent a significant barrier to the expansion of the renewable energy market.

الطاقة المتعددة ومخاطر بطاريات الليثيوم: دراسة تحليلية لتحديات إدارة النفايات الخطرة وتداعياتها على الاستدامة البيئية

نغم حسين نعمة¹، كرار عزيز عبد^{2*}

¹قسم اقتصاديات إدارة الاستثمار والاعمال، كلية اقتصاديات الاعمال، جامعة النهرين، بغداد، العراق

naghmalnama@gmail.com , Karar.azez15@gmail.com

معلومات البحث:

- تاريخ استلام البحث: 2025-08-31
- تاريخ إرسال التعديلات: 2025-09-05
- تاريخ قبول النشر: 2025-09-20
- تاريخ النشر: 2025-12-25

المؤلف المراسل:

كرار عزيز عبد
Karar.azez15@gmail.com



يتلخص الهدف من البحث في تحليل (المفارقة) المعقدة بين ضرورة التوسيع في استخدام المصادر المتعددة والنظيفة للطاقة باعتبارها أحد أهم أهداف التنمية المستدامة، وبين المخاطر الكامنة المرتبطة باستخدام بطاريات الليثيوم باعتبارها أجهزة حزن طاقة ذات موثوقية وكفاءة عالية في ظل الطبيعة المتقطعة للمصادر المتعددة للطاقة. وتلخصت مشكلة البحث في مدى قدرة ومردودة التدابير والسياسات الدولية الرامية لتحقيق التنمية المستدامة في مواجهة المخاطر الكامنة والتحديات المترتبة على استخدام تلك البطاريات. في حين كانت أبرز النتائج تتمثل في وجود انعكاسات سلبية كبيرة ومتزايدة على المزايا (الاجتماعية، البيئية والاقتصادية) التي يتحققها التوسيع في إنتاج الطاقة من المصادر النظيفة والمتجددة، وبالتالي انعكاسات سلبية على كل من البعد الاقتصادي، الاجتماعي والبيئي لعملية التنمية المستدامة، بينما جاءت أهم التوصيات مشددة على ضرورة سن التشريعات التي تتضمن إدارة العمل بهذا النوع من النفايات الخطرة، مع ضرورة توفير الدعم اللازم من قبل الأطراف (أصحاب المصلحة) وخصوصاً المنتجين، لضمان أن سوء التنظيم والإدارة الحالية لهذه الممارسات لا تأتي بظلالها التغيل مستقبلاً على عاتق الحكومات للتعامل مع الأزمات المترتبة على ذلك.

الكلمات المفتاحية: التنمية المستدامة، الطاقة المتعددة، الطاقة النظيفة.

المقدمة (Introduction)

في ظل السباق الذي يشهده عالمنا من أجل دمج المصادر المتعددة للطاقة في الشبكات الكهربائية كنوع من الاستجابة للنداء البيئي من أجل خفض بصمة الكربونية، وارتکاز هذا النوع من الدمج على قدرة وكفاءة أنظمة وتقنيولوجيا تخزين الطاقة في موازنة التقلبات الحاصلة في إنتاج الطاقة، الأمر الذي يجعل بطاريات الليثيوم لاعباً أساسياً في البنية التحتية للمنظومة الحديثة للطاقة. إن التطور السريع والهائل وزيادة الاعتماد على هذا النوع من أنظمة تخزين الطاقة في قطاع النقل وشبكات الكهرباء وغيرها من الاستخدامات يقودنا إلى تفاعلٍ متبادلٍ عالي التعقيد، إذ أن كل عملية توسيع في مشاريع الطاقة النظيفة والمتجددة سيقبله نموٌ ملحوظٌ في سوق بطاريات الليثيوم، الأمر الذي يساهم في زيادة مخاطر السلامة والمخاطر البيئية المرتبطة باستخدام هذا النوع من البطاريات.

مشكلة البحث (Research Problem)

في ظل الطبيعة المتقطعة للمصادر المتعددة للطاقة وانعكاس ذلك سلباً على موثوقية واعتمادية الطاقة المنتجة منها، مما يحتمّ البحث عن تقنيات تخزين فاعلة للطاقة، تتبّع المشكلة الأساسية لهذا للبحث من مقارنة "التكنولوجيا الخضراء" من حيث كيفية التوفيق بين التوسيع الكبير في الاستثمار في المصادر المتعددة للطاقة كاستجابة لأهداف التنمية المستدامة وأبرزها الهدف السادس "الطاقة النظيفة والموثوقة بالأسعار公允" من ناحية، وبين زيادة المخاطر والأضرار المرتبطة باستخدام بطاريات الليثيوم والتي تُعد تهديداً صريحاً لجوهر ذلك الهدف من ناحية أخرى، من هنا فإن بالإمكان صياغة المشكلة على النحو التالي: (هل سيكون وزن تحديات استخدام بطاريات الليثيوم في ظل التحول نحو الطاقة النظيفة والمتجددة أثقل من أن يتحمله ميزان التنمية المستدامة).

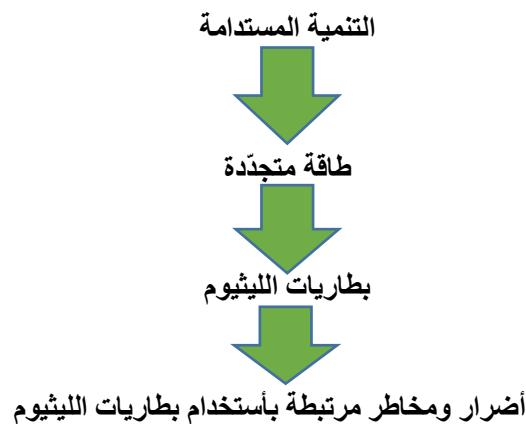
هدف البحث (Research Goal)

في ظل ما ورد في مشكلة البحث، يتمثل الهدف من البحث في الآتي: (تحليل ومعالجة المفارقة المعقدة الناشئة عن العلاقة الحرجة بين التحول نحو الطاقة المتعددة وبين تداعيات وانعكاسات استخدام بطاريات الليثيوم).

أهمية البحث (Significance of the Research)

تنجس الأهمية القصوى لهذا البحث في كونه استجابة مهمة وعاجلة لمشكلة وخطر كامن يهدد مجتمعنا، إذ يحاول البحث إيجاد التوازن المنطقي بين الحاجة الملحة لاستخدام بطاريات الليثيوم كأجهزة تخزين للطاقة المتعددة، وما ينتج عن ذلك الاستخدام من تصاعد كبير للمخاطر التي تفرض بحسب نسبة كبيرة المزايا المُتحصل عليها من التحول نحو المصادر النظيفة والمتجددة للطاقة، ويُعد هذا

البحث بمثابة الدليل المنطقي للجهات التشريعية والتنفيذية من أجل دمج ومواءمة (حكومة المخاطر) في مشاريع التحول نحو الطاقة الخضراء بعرض تحقيق الانقلال الآمن. ويوضح الشكل رقم (1) سلسلة العلاقة بين الطاقة المتعددة وبطاريات الليثيوم:



الشكل رقم (1) سلسلة العلاقة بين الطاقة المتعددة وبطاريات الليثيوم:
المصدر: الباحثان تأسيساً على منهجية البحث.

المستدامة لضمان حقوق الأجيال القادمة (عبد، 2023: 27).

ينبع الاهتمام بالمصادر المتعددة للطاقة كنوع من الاستجابة للتحديات الاقتصادية والبيئية التي يواجهها عالمنا، إذ أصبح التوجه نحو تبني المفاهيم التي تدعم الاستدامة أمراً حتمياً في مختلف القطاعات بما فيها الطاقة (خليل وأخرون، 2025: 1). فضلاً عن أن الاستثمار في تلك المصادر المتعددة يساهم في تحقيق الكفاءة في استخدام الموارد الطبيعية التي تمتاز بأنها نادرة والحفاظ عليها، بما فيها الوقود الأحفوري، الأمر الذي يساهم بصورة إيجابية خطوة مهمة في طريق إيجاد الحلول للمشكلة الاقتصادية الرئيسة "محظوظة الموارد ولا محظوظة الحاجات" (Neama et al., 2023: 1117). يوضح الشكل (2) أهداف خطة التنمية المستدامة:



الشكل رقم (2) أهداف خطة التنمية المستدامة (2015 – 2030).

المصدر: عبد، كرار عزيز (2023) الاستثمار في الطاقة المتعددة ودوره في التنمية المستدامة: بحث تطبيقي في عينة مختارة من مؤسسات الدولة (رسالة ماجستير غير منشورة). جامعة النهرین، كلية اقتصاديات الأعمال، قسم اقتصاديات إدارة الاستثمار والأعمال، بغداد، العراق. ص .56.

1. الطاقة الشمسية (Solar Energy)
تُعد الشمس أهم وأكبر مصدر للطاقة المتعددة، وتعتمد عليها أغلب المصادر الأخرى بصورة غير مباشرة، تتلخص

المحور الأول: الطاقة المتعددة
أولاً: مفهوم وتعريف الطاقة المتعددة
تُعد الطاقة المتعددة أحد أهم ركائز عملية التنمية لجميع البلدان، بالأخص في ظل التوجهات الدولية الرامية للتحول من المصادر الناضبة للطاقة إلى المصادر المتعددة (حمادي وآخرون، 2022: 2). وكذلك فهي تمثل أحد المتغيرات الرئيسية لتحقيق تنمية شاملة مستدامة، من خلال سعي المجتمعات إلى تأمين استهلاك الطاقة النظيفة بأسعار معقولة (نعمنة والدهام، 2022: 41). ويمكن تعريف الطاقة المتعددة بصورة عامة على أنها الطاقة التي يتم الحصول عليها من خلال استخدام المصادر الطبيعية مستمرة التجدد وغير الناضبة، وبالتالي دعم الفكرة الأساسية للتنمية

ثانياً: أبرز مصادر الطاقة المتعددة
توجد عدة مصادر متعددة للطاقة يمكن من خلالها توليد الطاقة الكهربائية والحرارة، من أبرزها:

من الجانب الاجتماعي والاقتصادي من عملية التنمية المستدامة، ويظهر ذلك جلياً من خلال الاستثمار في هذا القطاع المهم وما يرتبط به من توفير فرص عمل جديدة ومبكرة ومشاريع رائدة، خصوصاً في ظل التوجهات نحو الصيرفة الخضراء والاستثمار الأخضر (Neama et al., 2023: 1121). فضلاً عن أن المؤسسات التي تتبنى نهج الاستدامة بامكانها أن تحقق فوائد اجتماعية واقتصادية وبيئية كبيرة (الوطيفي وأخرون، 2025: 1). كما أن توفير طاقة مضمونة، نظيفة ومعقولة الأسعار يمكن أن يساهم في تقليل المخاطر المرتبطة بتقلب الأسعار العالمية للنفط وبالتالي تحسين الأمان القومي (عبد، 2023: 206).

رابعاً: آفاق وتحديات تطوير الطاقة المتعددة
توجد العديد من الآفاق والتحديات التي تواجه عملية التحول نحو هذا النوع من مصادر الطاقة، وتظهر تلك التحديات جلية في البلدان التي تمثل المصادر الأحفورية الهيكل الرئيسي في قطاع الطاقة لديها، فيما يأتي نبذة موجزة عن أبرز تلك الآفاق والمعوقات.

1. الآفاق المستقبلية الواعدة

على الرغم من المعوقات والتحديات الكبيرة التي تواجه التحول نحو المصادر النظيفة والمتعددة للطاقة، إلا أن هناك آفاقاً مستقبلية واعدة ومشتركة، نظراً للدعم الدولي الكبير المحفز لتوجهات الاستدامة واستخدام المصادر المتعددة للطاقة، فضلاً عن الدور الكبير الذي من الممكن أن يلعبه الابتكار على الرغم من التحديات التي تواجهه على صعيد الجهد والوقت والبحث والتطوير، إذ تشير الدراسات إلى أن كل زيادة بنسبة (1%) في الابتكار التكنولوجي يمكن أن تساهم في المدى الطويل في زيادة بنسبة (33%) في استخدام الطاقة من المصادر المتعددة (Han et al., 2025: 1). فضلاً عن وجود تأثير مهم لمحاسبة المستدامة، يسلط الضوء على التوجه الدولي الجاد لقياس الآثار البيئية للنشاطات المختلفة، وذلك من خلال التوجه نحو دمج الأبعاد الإجتماعية والبيئية في التقارير المحاسبية، مما يفضي إلى تعزيز الشفافية وكذلك الاستثمار في مجال الطاقة المتعددة والنظيفة (خليل وأخرون، 2025: 1).

2. أبرز التحديات

يُعد الاحتياج إلى استثمارات ضخمة في البنية التحتية والتكنولوجيا من أجل انتاج وتوزيع وхран الطاقة من أبرز التحديات التي تواجهه مشاريع التحول نحو الطاقة النظيفة (Nguyen et al., 2021: 490). إذ تشير الدراسات والأبحاث إلى أن تأثير الابتكار في الجانب التكنولوجي لا يزال يتطلب الكثير من الجهود والوقت للوصول إلى مرحلة التأثير الملحوظ على مشاريع الطاقة من المصادر المتعددة في العراق (Han et al., 2025: 1).

المotor الثاني: بطاريات أيون الليثيوم
ion batteries (LIBs)
(تحليل الأضرار والمخاطر وتلبية متطلبات السلامة البيئية الدولية)

أولاً: مدخل تعاريسي لمفهوم بطاريات الليثيوم

فكرتها بتحويل الإشعاع الشمسي إلى طاقة كهربائية أو حرارية من خلال استخدام الألواح الكهروضوئية المخصصة لهذا الغرض، وهنا تكمن أهمية الاستثمار في هذا النوع المستدام من الطاقة (عبد، 2023: 30).

2. طاقة الرياح (Wind Energy)
تتلخص آلية عملها من حركة الهواء التي تقوم بتحريك توربينات الرياح وبالتالي توليد الطاقة الكهربائية، وتعتمد من المصادر الواudedة في تشكيلة الطاقة المتعددة ودعم توجهات الاستدامة

3. الطاقة المائية (Hydropower)
تمثل حركة المياه الفكر الأساسية لتوليد الطاقة المائية، ويشار إليها بأنها من أكثر أنواع الطاقة استقراراً ومن أقدم أشكالها، وتعتمد بصورة كبيرة على السدود والأنهار، وهي مشاريع ضخمة تتطوّر على وجوب التخطيط البيئي المنظم والشامل واستخدام كفاءة للموارد الطبيعية المتاحة من أجل تحقيق أفضل النتائج (Neama et al., 2023: 1117).

4. طاقة الكتلة الحيوية (Biomass Energy)
يتم إنتاج هذا النوع من الطاقة من خلال المواد العضوية التي يكون مصدرها الكائنات الحية (النباتات والحيوانات) وكذلك النفايات. ويكمّن أحد أوجه الأهمية الكبيرة لهذا النوع من الطاقة في أهمية التعامل مع النفايات الخطرة، وما ينطوي على ذلك من تحسين كبير للبيئة، كون موضوع النفايات والضرر الناتج عنها يُعد من التحديات التي نعيشها ونلامسها بصورة مباشرة في حياتنا اليومية (EPA, 2005: 1).

5. الطاقة الحرارية الجوفية (Geothermal Energy)
هي أحد أشكال الطاقة الحرارية والتي تكون مخزونة في باطن الأرض، ويمكن استخدامها لأغراض التدفئة وتوليد الطاقة الكهربائية، وهي من أقدم أشكال المصادر النظيفة للطاقة التي استخدمها الإنسان تاريخياً بالإضافة على الطرق التقليدية البسيطة خصوصاً لأغراض التدفئة (CDPHE, 2021: 1).

ثالثاً: الأبعاد البيئية والتنمية للطاقة المتعددة
تلعب الطاقة المتعددة دور محوري في خطط التنمية المستدامة وحملة البيئة، وما يرتبط بذلك من مخاطر تتعلق بالأمن القومي للبلدان، كما هو الحال مع قضايا الجفاف والغبار والتصرّح وغيرها من القضايا التي تمس حياة الإنسان بصورة مباشرة، إذ تمثل الطاقة العصب الرئيسي لجميع القطاعات، والتي تعتمد عليها بشكل مباشر (السعدي، 2025: 1).

1. بعد البيئي والمناخي
طالما الطاقة هي الشريان الرئيس المغذي لجميع الفعاليات الحياتية، وفي ظل الاعتماد الكبير على الوقود الأحفوري في قطاع الطاقة، تكمن هنا الخطورة والأثر الكبير الناتج عن ذلك من حيث زيادة الإنبعاثات الضارة والتي أبرزها غاز ثاني أكسيد الكربون (Han et al., 2025: 1). فضلاً عن انعكاس ذلك بصورة مباشرة على تحسين صحة الإنسان وتحسين نوعية الحياة من خلال تحسين نوعية الماء والهواء والبيئة ككل (السعدي، 2025: 1).

2. بعد الاجتماعي والاقتصادي
دور الطاقة المتعددة لا يقتصر فقط على تعزيز الجانب البيئي، وإنما يمتد لأبعد من ذلك ليصل إلى كل

قياس الحرارة المتولدة داخل الخلية
احتراق المقادف (right) left(P_{IHG})
 فقد تم تطوير تقنيات متقدمة كما هو الحال مع المسعر النحاسي للبطارية الذي يقيس معدل الحرارة أثناء عملية الشحن والتفرغ، والذي يكون مدمج مع قياس السعرات الحرارية الخاصة بـ استهلاك الأكسجين خصوصاً بالنسبة للأنظمة التي تتضمن خلايا ذات كثافة عالية الطاقة 1: 2018). (Said et al.,

بالنسبة لبطاريات الليثيوم أيون فإن المخاطر الكيميائية قد تنشأ بشكل أساسى بسبب طبقة الحماية (الكيميائية) الموجودة على القطب السالب (واجهة الإلكتروليت الصلب - SEI)², فعند تعرض هذه الطبقة إلى درجات حرارة عالية ما بين °C (70 – 100) والذى يمثل الحد الحرج لعدم استقرار هذه الطبقة، اي بمجرد تجاوز الحد الأدنى لهذا الحد الحرج فإن طبقة الحماية تلك سوف تنهار وتحلل، بمعنى أنه سيكون هناك تفاعل موأد للحرارة يساهم في زيادة حرارة النظام مسبباً سلسلة من التفاعلات المدمرة التي تؤدي إلى الهروب الحراري (Lisbona & Snee, 2011: 435). عند حصول الهروب الحراري، يتم إطلاق غازات قابلة للاشتعال من خلايا بطارية الليثيوم، والخليط الغازي الناتج عن تلك العملية يتكون من الهيدروجين وأحادي ثاني أكسيد الكربون، فضلاً عن الهيدروكربونات كالميثان، وعند تراكم هذه الغازات سيكون هناك خطراً كبيراً للانفجار والحرق (1: 2020). Baird et al., 2020: أما فيما يخص بطاريات الليثيوم الأولية، فتشمل أبرز مخاطرها الكيميائية بسبب التفاعل الذي يحصل بين الليثيوم النقي والماء المستتر إلى داخل الخلية، إذ ينتج عن هذا التفاعل غاز الهيدروجين (شديد الاشتعال) وبالتالي زيادة احتمالية حدوث الاشتعال أو الانفجار الفوري، فضلاً عن مخاطرها المرتبطة باحتمالية حدوث التفاعلات بين المذيبات العضوية شديدة الاشتعال وبعض المؤكسدات القوية، هذه التفاعلات قد تكون عنيفة جداً وقد تتسبب في حدوث الانفجار (Lisbona & Snee, 2011: 435). ومن أجل تخفيض المخاطر المرتبطة بتلك الاحتمالات ينبغي اجراء دراسة تحليلية للخصائص، كالحد الأدنى لقابلية الاشتعال وسرعة الاحتراق الأساسية، هنا تظهر الحاجة الماسة إلى تطوير أنظمة تهوية صحيحة وفعالة في الأماكن المخصصة لتخزين تلك البطاريات من أجل تجنب تراكم الغازات المنبعثة وتجاوز الحد الأدنى للاشتعال (21: 2020). Baird et al., 2020: رابعاً: إدارة الامتثال للسلامة والبيئة

الوزن وصغيرة ومرنة من حيث التصميم، وتستخدم في التطبيقات التي تحتاج إلى بطارية صغيرة الحجم وخفيفة كما في الهواتف الحديثة وغيرها، تُعد أكثر تكافة بالمقارنة مع فوسفات الحديد، وأيضاً بسبب ارتفاع كثافة هذا النوع فإنه يحتاج إلى عناية أكثر فهي عرضة للاقتئاخ وكذلك الاشتعال (5: 2018). Jauch, بصورة عامة فإن الليثيوم أيون لا تزال الشكل الأكثر استخداماً لبطاريات الليثيوم.

(SEI) Solid Electrolyte Interphase

Lithium ion batteries (LIBs) هي أجهزة وظيفتها تخزين الطاقة الكهربائية عالية الكفاءة والفاعلية، يتم استخدامها في مجموعة متزايدة بشكل كبير ومستمر من التطبيقات الموجودة حولنا كالهواتف النقالة والسيارات وأجهزة (UPS) والحواسوب والبطاريات الصغيرة المستخدمة في الكثير من الأجهزة ذات الاستخدام اليومي في حياتنا كالريموت كونترول وسماعات الرأس وغيرها(1: 2018). Said et al., . وفي هذا السياق تم وصفها بأنها (أجهزة) كونها لها وظيفة محددة وهي تخزين الطاقة الكيميائية وتحويلها إلى طاقة كهربائية عند الحاجة. كما يُعد استخدامها في قطاع النقل من المحطات المهمة التي لا بد من التوقف عنها نظراً للأهمية الكبيرة لهذا القطاع وتأثيره على جميع القطاعات الأخرى (Baird et al., 2020: 1). ينبع التمييز بين نوعين أساسيين من بطاريات الليثيوم، النوع الأول هو البطاريات الأولية (أو المعدنية) وهي البطاريات التي يتم استخدامها لمرة واحدة فقط، أي ان التفاعل الكيميائي المؤدي للكهرباء يُعد تفاعلاً (غير عكسي) ويتم انتهاء عمر البطارия بمجرد استهلاك المواد الكيميائية فيها، ولا يمكن إعادة شحنها، كما في الإجهزة ذات موثوقية الافتراضي الطويل والتي تحتاج إلى طاقة ذات عمر عالية كما في أجهزة تنظيم دقات القلب وأجهزة أنظمة إنذار الدخان وغيرها من الاستخدامات (Lisbona & Snee, 2011: 435). أما النوع الثاني فهو بطاريات الليثيوم أيون الثانوية والتي هي الشكل الأكثر استخداماً من بطاريات الليثيوم كما في الاستخدامات التي تم إيضاحها سابقاً، وهي قابلة لإعادة الشحن والتفرغ (Ouyang et al., 2019: 1).

ثانياً: الأضرار الحرارية ومخاطر الاشتعال والانفجار
 تصنف أضرار بطاريات الليثيوم إلى عدة أنواع، أبرزها الأضرار الهندسية، الحرارية، والكيميائية، والتي قد تؤدي للوصول إلى الانهيار الحراري (Ouyang et al., 2019: 1). كذلك فهناك مخاطر بيئية كبيرة، وتعزى أسباب جميع تلك الأضرار أساساً إلى الفشل الذي يحصل في كل من التشغيل والإدارة، الأمر الذي يهدد السلامة البيئية والسلامة العامة (IMCA, 2022: 4).

ثالثاً: تحليل المخاطر والأضرار
يُنظر إلى الهروب الحراري (Thermal Runaway) على أنه خطير محوري يمكن أن يؤدي إلى الحريق أو الانفجار. إن التفاعل الكيميائي الذي تحفزه الحرارة يولد طاقة هائلة، وبذلك فإن الحصول على معلومات دقيقة حول كمية الطاقة المنبعثة يُعد أمراً بالغ الأهمية من أجل تصميم أنظمة تخزين طاقة تتسم بالأمان (1: 2018). Said et al., 2018:

¹ تم تطوير أنواع حديثة من بطاريات الليثيوم مثل بطاريات فوسفات حديد الليثيوم (LFP) (Lithium Ferrum Phosphate) وتسخدم فوسفات الحديد والليثيوم وهي النوع الأكثر أماناً ومقاومة للهروب الحراري وأطول عمر افتراضي (دورات الشحن العالية)، في نفس الوقت لديها كثافة طاقة منخفضة فهي تكون (أكبر حجماً وأقل لنفس القدرة)، التوجه نحو هذا النوع لا يزال حرجاً نظراً لتدور سمعتها في درجات الحرارة العالية (Jin et al., 2025: 1).

² فضلاً عن بطاريات الليثيوم بوليمر (Li-Po) (Lithium Polymer) ومتانز بكتافتها العالية جداً وفي نفس الوقت خفية

في ظل التوجهات الدولية نحو التنمية المستدامة تبرز الطاقة بصفتها القلب النابض والمحرك الرئيس لعجلة التنمية، وفي ظل السياسات الخضراء التي تؤطر عملية التنمية المستدامة، وما يترتب على ذلك من توجهات وضعوط دولية كبيرة لتقليل الانبعاثات الضارة والتلوث الذي يرافق عملية انتاج الطاقة من المصادر التقليدية، تتوجه الأنظار نحو المصادر النظيفة والمستدامة للطاقة والتي لا يترتب على استخدامها انبعاثات ضارة (Neama et al., 2023: 1117). وإذا ما أخذنا بنظر الإعتبار أهمية الابتكار في قطاع التكنولوجيا في زيادة التوجه نحو تبني الطاقة النظيفة، فسوف نشهد توجه كبير نحو الحلول الفاعلة لتخزين الطاقة (Han et al., 2025: 1).

نتيجةً لذلك، تظهر مدفوعةً بمزاياها الكبيرة من حيث كفاءة التخزين والكثافة العالية للطاقة، بطاريات الليثيوم كلاعب أساس في العديد من الاستخدامات مثل منظومات الطاقة الشمسية ووسائل النقل الكهربائية (Ouyang et al., 2019: 1).

هنا تتضح لنا جلياً (**المفارقة**) التي تحاول تسليط الضوء عليها، فإذا ما أخذنا بنظر الإعتبار المخاطر الحرارية العالية والتي قد تصيب للحرائق والانفجارات لهذه البطاريات، سترى بأنه كلما زاد استخدامها، كلما زادت الأضرار والمخاطر المرتبطة بالسلامة والمترتبة على ذلك الاستخدام، مما يفضي إلى وجود علاقة طردية بين زيادة استخدامها وتصاعد التهديدات البيئية والاجتماعية والاقتصادية، ومن منظور آخر علاقة عكسية بين زيادة استخدامها وبين إمكانية تحقيق الأهداف التي ترسمها خطط التنمية المستدامة والتكنولوجيا الخضراء.

ثانيًا: بعد التنظيمي والبيئي
 كنتيجة لسياسات التحول نحو الطاقة المتجددة والنظيفة، أصبح استخدام بطاريات الليثيوم أيون مزدهراً بشكل كبير، مما أدى إلى زيادة كبيرة في حجم النفايات الناتجة عن استخدامها، مما يحتمّ وجود ضوابط تنظيمية حازمة تهدف إلى إدارة تلك النفايات وإيجاد طرق مناسبة للتخلص منها (United Nations, 2019: 4). وبعرض الوقاية من مخاطر الانفجار والحريق المرتبطة بها، تم إيجاد إرشادات خاصة تنظم عملية التخزين الآمن في المنشآت المعنية بالمعالجة (Environmental Protection Agency, 2005: 5).

لإيجاد طرق مناسبة لمعالجة بطاريات الليثيوم، أو (إعادة تدويرها) وفقاً لقوانين "إدارة النفايات الخطرة"، بدلاً من رميها في مكبّات النفايات التقليدية، فضلاً عن تقليل الأعباء التنظيمية، تم تصنيف البطاريات المستعملة ضمن "برامج إدارة النفايات الشاملة" "Universal Waste" (Colorado Environmental Protection Agency, 2023: 5).

3480: بطاريات أيونات الليثيوم (بما في ذلك بطاريات الليثيوم البوليمرية)، 3481: بطاريات أيونات الليثيوم المعبأة في المعدات أو المعبأة مع المعدات (بما في ذلك بطاريات الليثيوم البوليمرية) (UN, 2019: 175).

في ظل المخاطر العالمية التي تتطوّر على استخدام بطاريات الليثيوم ينبغي أن يتم الامتثال للإجراءات واللوائح والشتريّعات والتنظيمات التشغيلية السائدة، إذ إنّ الفشل في تطبيق تلك الإجراءات يُعدّ أحد أهم الأساليب المؤدية للحوادث، بالأخص فيما يتعلق بعمليّة التعبئة والتأكد من وجود العلامات المناسبة وكذلك تصنيفها ضمن فئة المواد الخطرة (IMCA, 2022: 4).

1. اللوائح المتعلقة بالنقل والمخاطر التشغيلية
 تستوجب سلامة عملية النقل واجراءات التعامل مع بطاريات الليثيوم أيون تطبيق لوائح حازمة، من أبرز تلك اللوائح توصيات الأمم المتحدة بخصوص نقل البضائع الخطرة (UN Model Regulations³، فيما يتعلق بمتطلبات عملية التغليف والتعبئة فضلاً عن اجراءات الشحن من أجل ضمان السلامة العامة (UN, 2019: 5). أيضًا فإن اللوائح الأمريكية التي تعنى بالمواد الخطرة (HMR) تحدد بوضوح أنواع المواد التي قد تشكل تهديداً للسلامة والصحة عند النقل، كما تدرجها تحت تصنّيف (البضائع الخطرة) وطبقاً إلى اللوائح المشار إليها أعلاه فإن بطاريات الليثيوم تم تصنيفها ضمن الفئة (9) وهي فئة المنتجات والمواد الخطرة (U.S. DOT, 2025: 11-18).

2. إدارة النفايات والمخاطر البيئية
 إن المخاطر البيئية الكبيرة لبطاريات الليثيوم تُحتمّ وجود إدارة صارمة لنفاياتها، خصوصاً في مرافق المعالجة، إذ يُعدّ عزل أطراف البطاريات من خلال استخدام شريط عازل للحرائق سواء في عملية التخزين المؤقت أو التخلص منها فضلاً عن أن عدم وجود عملية فصل صحيحة لذلك النفايات يؤدي إلى تلوث بيئي واسع النطاق، بالأخص عند التعامل مع مياه إطفاء الحرائق التي تكون عالية التلوث نتيجة اختلاطها بالكثير من المواد الضارة (EPA, 2023: 50-51). ومن أجل إيجاد معالجة لهذا التحدّي، قد طورت وكالة حماية البيئة الأمريكية (EPA) برنامج النفايات الشاملة (Universal Waste) من أجل تبسيط إدارة بعض أنواع النفايات الخطرة، بما في ذلك البطاريات، بهدف التشجيع على إعادة تدويرها، يُعدّ هذا البرنامج مهم لقليل الأعباء التنظيمية على المنتجين وزيادة احتمالية إدارة هذه النفايات بمعزل عن أنظمة إدارة النفايات غير الخطرة (EPA, 2005: 5). وتؤكد العديد من التشريعات مثل لوائح ولاية كولورادو، على أهمية إدراج البطاريات والأجهزة الإلكترونية ضمن برامج النفايات الشاملة من خلال وجود إطار قانوني مناسب من أجل تحقيق الالتزام البيئي (Colorado, 2021: 2).

المحور الثالث: تحليل الانعكاسات والأثار أولاً: مفارقة التحول الطاقي

3 أبرز تصنّيفات الأمم المتحدة لبطاريات الليثيوم: 3090: بطاريات الليثيوم المعدنية (بما في ذلك بطاريات سيارات سيانك الليثيوم)، 3091: بطاريات الليثيوم المعدنية المعبأة في المعدات أو المعبأة مع المعدات (بما في ذلك بطاريات سيانك الليثيوم)،

- عملية التعبئة ووضع العلامات الملائمة فضلاً عن تصنيفها ضمن فئة المواد الخطرة.
5. يُعد ضعف تطبيق آليات "توسيع مسؤولية المنتج" (EPR)⁴ الفاعلة والملزمة في أغلب التشريعات، من أهم أسباب الوصول إلى مستويات عالية لحجم الفيروسات الخطرة لبطاريات الليثيوم، الأمر الذي يُعد بمثابة التزام بيئي (مؤجل) يساهم في تخفيض المزايا البيئية التي تنتجه عن استخدام المصادر المتعددة للطاقة.
6. الكلفة السوقية لبطاريات الليثيوم (ضمن قطاع الطاقة النظيفة والمتعددة) ليست انعكاساً للكلفة الحقيقة لدوره جيابتها كاملةً، إذ لا تأخذ بنظر الاعتبار تكاليف الاحتراء والسلامة والتخلص الآمن وإعادة التدوير، الأمر الذي قد يشكل عائقاً مهماً أمام التوسع في سوق الطاقة المتعددة.
- ثانياً: التوصيات**
- من أجل التعامل الكفوء والفاعل مع مفارقة الليثيوم وضمان نجاح التحول الطاقي، فإن البحث يوصي بما يأتي:
1. سن تشريع دولي "توسيع مسؤولية المنتج" ملزماً وموحدًّا (على صعيد نطاق التطبيق والآليات وكافة التفاصيل)، يفرض على جميع الجهات (المعنيبة) في قطاع الطاقة النظيفة والمتعددة (من الموردين إلى المشغلين) اعتماد (مسؤولية المنتج)، وإيجاد (صناديق انتقام) إلزامية (على الفور) لتمويل الأنشطة المرتبطة بجمع ومعالجة وإعادة تدوير البطاريات، للمساهمة في حل المشكلة وعدم ترك العبء المستقبلي على عاتق الحكومات.
 2. البدء بعملية التحول الجاد من المعايير التفاعلية للسلامة (كالكشف عن الحرائق والإطفاء) إلى تبني المعايير التنبؤية للسلامة (Predictive Safety)⁵ القائمة على تطبيق "أنظمة إدارة البطارية" (BMS)، من خلال الذكاء الاصطناعي التي تساعده على اتخاذ التدابير اللازمة قبل وقوع الحادث، مع ضرورة تحديد الحدود الدنيا للاشتغال وتطوير أنظمة تهوية كفؤة لمنع تراكم الغازات.
 3. ضرورة إطلاق مبادرات وطنية استراتيجية مُمولة لدعم وتحفيز (البحث والتطوير) فضلاً عن (التجريب) فيما يتعلق بتقنيات تخزين الطاقة المستدامة ذات الموثوقية العالية والمخاطر المنخفضة من أجل خلق مرنة عالية في هذا القطاع.
 4. العمل الجاد والفوري من أجل إيجاد بُنية تحتية (إقليمية) متخصصة (بإعادة التدوير) بطاريات الليثيوم، مع ضرورة استثمار الدعم الدولي الخاص بتوسيع استخدام الطاقة النظيفة والحفاظ على البيئة لعقد اتفاقيات دولية تدعم هذا التوجه لضمان النقل النقل الآمن لهذا النوع الخطير من الفيروسات، وبالتالي تعزيز الجانب البيئي، فضلاً عن تعزيز الجانب الاقتصادي من خلال الاستخلاص الفاعل للمواد القيمة.

⁵ BMS - Battery Management System (نظام إدارة البطارية) بمثابة الدمام الإلكتروني المسؤول عن إدارة (المراقبة والحماية) البطاريات القابلة لإعادة الشحن كما في (بطاريات الليثيوم أيون والليثيوم بوليمر) التي يتم استخدامها غالباً في أنظمة تخزين الطاقة، السيارات الكهربائية والأجهزة الإلكترونية الكبيرة (Ouyang et al., 2019: 2).

يمكن النظر إلى هذا الإطار التنظيمي على أنه أحد الركائز الأساسية التي تمثل التزام البلدان المختلفة بمتطلبات التنمية المستدامة، فهو بمثابة حلقة الوصل بين سياسات حماية البيئة من ناحية، وبين عملية الإدارة (المسؤولة) في التعامل مع التكنولوجيا المتقدمة من ناحية أخرى (Hamadi وأخرون، 2025: 2).

ثالثاً: تحليل العلاقة بين (بطاريات الليثيوم) و (التحول نحو الطاقة المتعددة)

يُعد (النقطع والتذبذب) من أبرز معوقات إنتاج الطاقة من المصادر النظيفة والمتعددة والتي أبرزها (الرياح والشمسية)، مما يخلق تحديات كبيرة في عملية استخدامها في رفد الشبكة المركزية للكهرباء (Ouyang et al., 2019: 1).

نتيجة لذلك، ومن أجل ضمان توفير إمدادات آمنة ومستقرة لشبكة الكهرباء، وكذلك ضمان تحقيق الهدف السابع من أهداف التنمية المستدامة وهو "ضمان حصول الجميع بتكاليف ميسورة على خدمات الطاقة الحديثة الموثوقة والمستدامة". تتضح لنا مرة أخرى الأهمية الكبيرة لتقنيات التخزين الحديثة للطاقة بما فيها بطاريات الليثيوم، إذ تطرح نفسها كخيار ذو كفاءة عالية من حيث الكثافة والفعالية.

هذا التشابك الحيوي، والعلاقة التكاملية بين عملية إنتاج الطاقة من المصادر النظيفة والمتعددة وبين التقنيات الحديثة لتخزين الطاقة، على الرغم من أن ذلك يُعد بمثابة الوقود الدافع لعجلة التحول في أنظمة الطاقة للوصول إلى تجارة شاملة ومستدامة، لكن في نفس الوقت فهو يساهم في زيادة الاعتماد على أنظمة تتبعها على مخاطر كامنة عالية، الأمر الذي يحتم إدارتها بحذر وكفاءة.

الاستنتاجات والتوصيات

تأسيساً على ما تم التوصل إليه من البحث، وتحليل العلاقة التبادلية بين الاستجابة لنداء البيئة وبين مخاطر التكنولوجيا، فقد تم التوصل إلى الاستنتاجات والتوصيات التالية:

أولاً: الاستنتاجات

1. كل زيادة في عملية التوسع نحو سوق الطاقة النظيفة والمتعددة تقابلها زيادة ملحوظة في استخدام بطاريات الليثيوم.

2. يمثل الهروب الحراري الخطر الرئيس لبطاريات الليثيوم أبؤن، إذ يكون نتيجة لتفاعلات الكيميائية التي تُحرّكها بعض العوامل التسخينية والكيميائية كالتقادم والعيوب المصنعة.

3. يرافق عملية الانهيار الحراري وجود انبعاثات لبعض الغازات القابلة للاشتغال (أحادي أكسيد الكربون والهيدروجين)، وبالتالي زيادة احتمال حصول الحرائق والانفجارات.

4. تعود أغلب الحوادث المرتبطة باستخدام بطاريات الليثيوم إلى عدم نجاح الإجراءات التنظيمية على صعيد

⁴ بالنسبة لإدارة المخلفات، يُعد "توسيع مسؤولية المنتج Extended Producer Responsibility" الإستراتيجيات التي تهدف إلى إضافة كافة التكاليف، التي تترتب على المنتج بدءاً من مرحلة التصميم ولغاية نهاية دورة حياته (Chen et al., 2013: 3).

- institutions (Master's thesis). Al-Nahrain University, College of Business Economics, Department of Investment and Business Management Economics, Baghdad, Iraq.
6. Naama, N. H., & Al-Daham, K. A. (2022). Renewable energy as a key variable in achieving sustainable development. Kirkuk University Journal for Administrative and Economic Sciences, Special Issue.
7. Baird, A. R., Archibald, E. J., Marr, K. C., & Ezekoye, O. A. (2020). Explosion hazards from lithium-ion battery vent gas. *Journal of Power Sources*, 446, 1-24.
8. Chen, Y., Kang, Y., Zhao, Y., Wang, L., & Liu, J. (2013). Recycling of spent lithium-ion batteries and related environmental issues: A review. *Journal of Power Sources*, 222, 1–25.
9. Colorado Department of Public Health and Environment (CDPHE). (2021). Colorado Hazardous Waste Regulations: Part 273 Standards for Universal Waste Management. 1-10.
10. Environmental Protection Agency (EPA) (2005) Introduction to Universal Waste. (EPA530-K-05-019).
11. Environmental Protection Agency (2023) Guidance on the Safe Storage of Lithium-Ion Batteries at Waste Handling Facilities (text {ISBN} 978-1-80009-149-8), Environmental Protection Agency, Ireland.
12. Han, S., Peng, D., Guo, Y., Aslam, M. U., & Xu, R. (2025) Harnessing technological innovation and renewable energy and their impact on environmental pollution in G-20 countries. *Scientific Reports*, 15(2236), 1.
13. International Marine Contractors Association (IMCA). (2022). USB power bank (Lithium battery) fire (Safety Flash 09/22). 1-6.
14. Jin, G., Zhao, W., Zhang, J., Liang, W., Chen, M., & Xu, R. (2025). High-Temperature Stability of LiFePO₄/Carbon Lithium-Ion Batteries: Challenges and Strategies. *Sustain. Chem.*, 6(1), 7.
15. Jauch. (2018). *Introduction to Lithium Polymer Battery Technology* (White

5. الضرورة القصوى لإيجاد آلية وطنية واضحة داخل العراق لتنظيم العمل فيما يخص جمع تقنيات بطاريات الليثيوم خطوة أولى، فضلاً عن أهمية إيجاد وسائل فاعلة لمعالجتها.

توافر البيانات:
تم تضمين البيانات المستخدمة لدعم نتائج هذه الدراسة في المقالة.

تضارب المصالح:
يعلن المؤلفون أنه ليس لديهم تضارب في المصالح.

موارد التمويل:
لم يتم تلقي أي دعم مالي.

شكر وتقدير:
لا أحد.

References:

1. Al-Saidi, S. U. (2025). Environmental and climatic changes and their impact on the management of international conflicts. *Journal of Imam University College / Humanities*, 2 (Special Issue: Proceedings of the Second Annual Scientific Conference).
2. Al-Wutayfi, K. S., Al-Shammari, N., Al-Humairi, B. A., & Al-Hindawi, Z. A. (2025). A study of the relationship between investment in human capital and organizational sustainability: An analytical study of the opinions of a sample of faculty members at the University of Babylon. *Al-Riyada Journal of Finance and Business*, Special Issue (2).
3. Hammadi, A. A., Mohsen, M. Z., & Al-Zarkoushi, A. H. K. (2022). The role of renewable energy in achieving the environmental dimension of development. *Kirkuk University Journal for Administrative and Economic Sciences*, Special Issue.
4. Khalil, D. H., Latif, H. A., & Ali, H. (2025). Sustainable accounting and its role in developing accounting practices in the Iraqi economy: A case study of Unilever. *Port Journal for Scientific Research*, 8 (Special Issue).
5. Abd, K. A. (2023). Investment in renewable energy and its role in sustainable development: An applied study on a selected sample of state

- Paper). Jauch Quartz GmbH & Jauch Battery Solutions GmbH.
16. Larminie, M., & Wormald, R. (2023). Chapter 16: Safety of primary lithium batteries. In Electric Vehicle Technology Explained (3rd ed.) (pp. 377–400). Wiley.
17. Lisbona, D., & Snee, T. (2011). A review of hazards associated with primary lithium and lithium-ion batteries. *Process Safety and Environmental Protection*, 89(6), 434–442.
18. Neama, N. H., Abbood, R. H., & Al Daham, K. A. (2023) Renewable Energy Is an Essential Variable in Achieving Sustainable Development. *Open Journal of Business and Management*, 11(3).
19. Nguyen, X. P., Le, N. D., Pham, V. V., Huynh, T. T., Dong, V. H., & Hoang, A. T. (2021) Mission, challenges, and prospects of renewable energy development in Vietnam. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 43(19).
20. Said, A. O., Lee, C., Liu, X., Wu, Z., & Stoliarov, S. I. (2018). Simultaneous measurement of multiple thermal hazards associated with a failure of prismatic lithium-ion battery. *Proceedings of the Combustion Institute*, 000, 1-8.
21. Solar Energy Industries Association (SEIA) (2023) Solar Market Insight Report 2023. [External Source - Google Search].
22. United Nations (2019) Recommendations on the Transport of Dangerous Goods, Model Regulations, Volume I (Twenty-first revised edition), United Nations.
23. Ouyang, D., Chen, M., Huang, Q., Weng, J., Wang, Z., & Wang, J. (2019). A Review on the Thermal Hazards of the Lithium-Ion Battery and the Corresponding Countermeasures. *Applied Sciences*, 9(12), 1-45.
24. U.S. Department of Transportation (U.S. DOT) (2025). (n.d.). How to Use the Hazardous Materials Regulations CFR 49 Parts 100 To 185. 1-34.