Entrepreneurship Journal for Finance and Business (EJFB)
2025, VOL. 06, NO. 04, 194-202, E-ISSN: 2709-4251, P-ISSN: 2708-8790
DOI: https://doi.org/10.56967/ejfb2025767

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

Nagham H. Neama [1], Karrar A. Abd [2*]
[1,2]Department of investment and business management economics, College of business economics, Al-Nahrain University, Baghdad, Iraq
naghamalnama@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.

مجلة الريادة للمال والاعمال
2025، المجلد السادس، العدد (04) ، الصفحات 194- 202

الطاقة المتجدّدة ومخاطر بطاريات الليثيوم: دراسة تحليلية لتحديات إدارة النفايات الخَطِرة وتداعياتها على الاستدامة البيئية

نغم حسين نعمة [1]، كرار عزيز عبد[2*]
[1، 2]قسم اقتصاديات إدارة الاستثمار والاعمال، كلية اقتصاديات الاعمال، جامعة النهرين، بغداد، العراق
naghamalnama@gmail.com , Karar.azez15@gmail.com

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

***المؤلف المراسل:**
كرار عزيز عبد
Karar.azez15@gmail.com

هذا العمل مرخص بموجب المشاع الابداعي نسب المصنف 4.0 دولي (CC BY 4.0)

المستخلص:

يتلخّص **الهدف** من البحث في تحليل (المفارقة) المعقَّدة بين ضرورة التوسع في استخدام المصادر المتجدّدة والنظيفة للطاقة باعتبارها أحد أهم أهداف التنمية المستدامة، وبين المخاطر الكامنة المرتبطة باستخدام بطاريات الليثيوم باعتبارها أجهزة خزن طاقة ذات موثوقية وكفاءة عالية في ظل الطبيعة المتقطّعة للمصادر المتجدّدة للطاقة. وتلخّصت **مشكلة** البحث في مدى قدرة ومرونة 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 يحققها التوسع في إنتاج الطاقة من المصادر النظيفة والمتجدّدة، وبالتالي انعكاسات سلبية على كل من البُعد (الاقتصادي، الاجتماعي والبيئي) لعملية التنمية المستدامة، بينما جاءت **أهم التوصيات** مشدِّدة على ضرورة سَن التشريعات التي تنظِّم إدارة العمل بهذا النوع من النفايات الخطرة، مع ضرورة توفير الدعم اللازم من قِبَل الأطراف (أصحاب المصلحة) وخصوصًا المنتِجين، لضمان أن سوء التنظيم والإدارة الحالية لهذه الممارسات لا تلقي بظلالها الثقيل مستقبلاً على عاتق الحكومات للتعامل مع الأزمات المترتبة على ذلك.

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

المقدِّمة (Introduction)

في ظل السباق الذي يشهده عالمنا من أجل دمج المصادر المتجدّدة للطاقة في الشبكات الكهربائية كنوع من الاستجابة للنداء البيئي من أجل خفض البصمة الكربونية، وارتكاز هذا النوع من الدمج على قدرة وكفاءة أنظمة وتكنولوجيا تخزين الطاقة في موازنة التقلبات الحاصلة في إنتاج الطاقة، الأمر الذي يجعل بطاريات الليثيوم لاعبًا أساسيًا في البنى 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 ان كل عملية توسع في مشاريع الطاقة النظيفة والمتجدّدة سيقابله 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 المتقطِّعة للمصادر المتجدّدة للطاقة وانعكاس ذلك سلبًا على موثوقية واعتمادية الطاقة المُنتَجَة منها، مما يُحَتِّم البحث عن تقنيات تخزين فاعلة للطاقة، تنبع المشكلة الأساسية لهذا للبحث من مفارقة **"التكنولوجيا الخضراء"** من حيث كيفية التوفيق بين التوسع الكبير في الاستثمار في المصادر المتجدّدة للطاقة كاستجابة لأهداف التنمية المستدامة وأبرزها الهدف السابع "الطاقة النظيفة **والموثوقة** بالأسعار المعقولة" من ناحية، وبين زيادة المخاطر والأضرار المرتبطة باستخدام بطاريات الليثيوم والتي تُعد تهديدًا صريحًا 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 والمتجدّدة **أثقل** من أن يتحمله ميزان التنمية المستدامة).

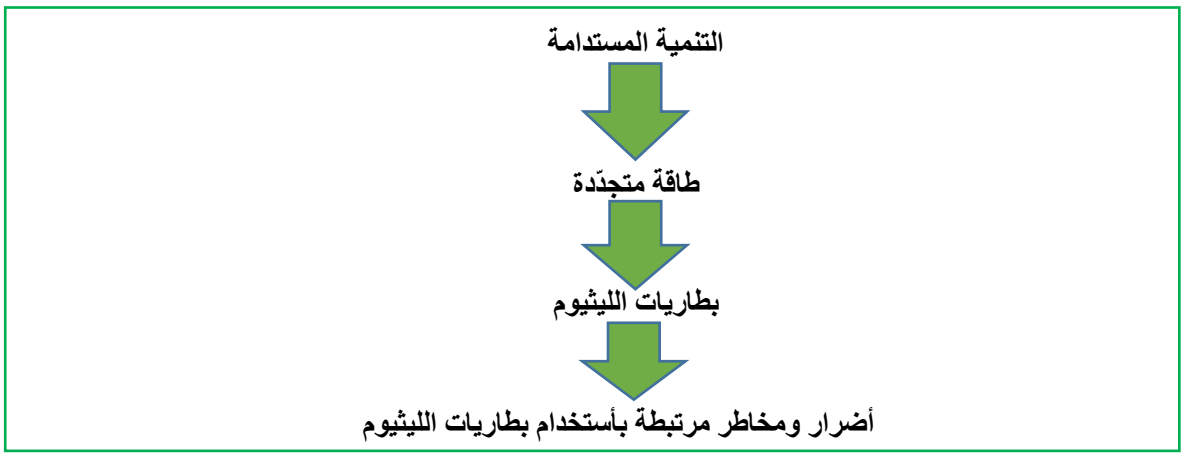
هدف البحث (Research Goal)

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

أهمية البحث Significance of the Research

تتجسد الأهمية القصوى لهذا البحث في كونه استجابة مهمة وعاجلة لمشكلة وخطر كامن يهدد مجتمعنا، إذ يحاول البحث إيجاد التوازن المنطقي بين الحاجة المُلِحّة لاستخدام بطاريات الليثيوم كأجهزة تخزين للطاقة المتجدّدة، وما ينتج عن ذلك الاستخدام من تصاعد كبير للمخاطر التي تُقَوّض بنسبة كبيرة المزايا المُتَحَصّل عليها من التحول نحو المصادر النظيفة والمتجدّدة للطاقة، **ويُعد هذا**

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



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

المحور الأول: الطاقة المتجدّدة

أولاً: مفهوم وتعريف الطاقة المتجدّدة

تُعدّ الطاقة المتجدّدة أحد أهم ركائز عملية التنمية لجميع البلدان، بالأخص في ظل التوجهات الدولية الرامية للتحول من المصادر الناضبة للطاقة إلى المصادر المتجدّدة (حمادي وآخرون، 2022: 2). وكذلك فهي تمثّل أحد المتغيرات الرئيسة لتحقيق تنمية شاملة مستدامة، من خلال سعي المجتمعات إلى تأمين استهلاك الطاقة النظيفة بأسعار معقولة (نعمة وآل دهام، 2022: 41). ويمكن تعريف الطاقة المتجدّدة بصورة عامة على أنها الطاقة التي يتم الحصول عليها من خلال استخدام المصادر الطبيعية مستمرة التجدد وغير الناضبة، وبالتالي دعم الفكرة الأساسية للتنمية المستدامة لضمان حقوق الأجيال القادمة (عبد، 2023: 27).

ينبع الاهتمام بالمصادر المتجدّدة 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 وآخرون، 2025: 1). فضلاً عن أن الاستثمار في تلك المصادر المتجدّدة يساهم في تحقيق الكفاءة في استخدام الموارد الطبيعية التي تمتاز بأنها نادرة والحفاظ عليها، بما فيها الوقود الأحفوري، الأمر الذي يساهم بصورة إيجابية كخطوة مهمة في طريق إيجاد الحلول للمشكلة الإقتصادية الرئيسة "محدودية الموارد ولا محدودية 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 المتجدّدة ودوره في التنمية المستدامة: بحث تطبيقي في عينة مختارة من مؤسسات الدولة (رسالة ماجستير غير منشورة). جامعة النهرين، كلية اقتصاديات الأعمال، قسم اقتصاديات إدارة الاستثمار والأعمال، بغداد، العراق. ص 56.

ثانيًا: أبرز مصادر الطاقة المتجدّدة

توجد عدة مصادر متجدّدة للطاقة يمكن من خلالها توليد الطاقة الكهربائية والحرارة، من أبرزها:

1. الطاقة الشمسية (Solar Energy)

تُعد الشمس أهم وأكبر مصدر للطاقة المتجدّدة، وتعتمد عليها أغلب المصادر الأخرى بصورة غير مباشرة، تتلخص

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، وتُعد من المصادر الواعدة في تشكيلة الطاقة المتجدّدة ودعم توجهات الاستدامة

3. الطاقة المائية (Hydropower)

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

4. طاقة الكتلة الحيوية (Biomass Energy)

يتم انتاج هذا النوع من الطاقة من خلال المواد العضوية التي يكون مصدرها الكائنات الحية (النباتات والحيوانات) وكذلك النفايات. ويكمن 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 يُعَدّ من التحديات التي نعيشها ونلمسها 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 اشكال المصادر النظيفة للطاقة التي استخدمها الإنسان تاريخيًا بالإعتماد على الطرق التقليدية البسيطة خصوصًا لأغراض التدفئة (CDPHE, 2021: 1).

ثالثًا: الأبعاد البيئية والتنموية للطاقة المتجدّدة

تلعب الطاقة المتجدّدة دور محوري في خطط التنمية المستدامة وحماية البيئة، وما يرتبط بذلك من مخاطر تتعلق بالأمن القومي للبلدان، كما هو الحال مع قضايا الجفاف والغبار والتصحر وغيرها من القضايا التي تمس حياة الإنسان بصورة مباشرة، إذ تمثل الطاقة العصب الرئيس لجميع القطاعات، والتي تعتمد عليها بشكل مباشر (السعيدي، 2025: 1).

1. البعد البيئي والمناخي

طالما الطاقة هي الشريان الرئيس المغذي لجميع الفعاليات الحياتية، وفي ظل الإعتماد 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 (السعيدي، 2025: 1).

2. البعد الاجتماعي والاقتصادي

دور الطاقة المتجدّدة لا يقتصر فقط على تعزيز الجانب البيئي، وانما يمتد لأبعد من ذلك ليصل إلى كل من الجانب الاجتماعي والاقتصادي من عملية التنمية المستدامة، ويظهر ذلك جليًا من خلال الاستثمار في هذا القطاع المهم وما يرتبط به من توفير فرص عمل جديدة ومبتكرة ومشاريع رائدة، خصوصاً في ظل التوجهات نحو الصيرفة الخضراء والاستثمار الأخضر (Neama et al., 2023: 1121). فضلاً عن أن المؤسسات التي تتبنى نهج الاستدامة بإمكانها أن تحقق فوائد اجتماعية واقتصادية وبيئية كبيرة (الوطيفي وآخرون، 2025: 1). كما ان توفير طاقة مضمونة، نظيفة ومعقولة الأسعار يمكن أن يساهم في تقليل المخاطر المرتبطة بتلقب الأسعار العالمية للنفط وبالتالي تحسين الأمن القومي (عبد، 2023: 206).

رابعًا: آفاق وتحديات تطوير الطاقة المتجدّدة

توجد العديد من الآفاق والتحديات التي تواجه عملية التحول نحو هذا النوع من مصادر الطاقة، وتظهر تلك التحديات جلية في البلدان التي تمثّل المصادر الأحفورية الهيكل الرئيس في قطاع الطاقة لديها، فيما يأتي نُبذة موجزة عن أبرز تلك الآفاق والمعوقات.

1. الآفاق المستقبلية الواعدة

على الرغم من المعوقات والتحديات الكبيرة التي تواجه التحول نحو المصادر النظيفة والمتجدّدة للطاقة، إلا أن هناك آفاقاً مستقبلية واعدة ومشرقة، نظراً للدعم الدولي الكبير المحفّز لتوجهات الاستدامة واستخدام المصادر المتجدّدة 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 المتجدّدة (Han et al ., 2025: 1). فضلاً عن وجود تأثير مهم للمحاسبة 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 المتجدّدة والنظيفة (خليل وآخرون، 2025: 1).

2. أبرز التحديات

يُعَدّ الاحتياج إلى استثمارات ضخمة في البنى التحتية والتكنولوجيا من أجل انتاج وتوزيع وخزن الطاقة من أبرز التحديات التي تواجه مشاريع التحول نحو الطاقة النظيفة (Nguyen et al.,2021: 490). إذ تشير الدراسات والأبحاث إلى أن تأثير الابتكار في الجانب التكنلوجي لا يزال يتطلب الكثير من الجهود والوقت للوصول إلى مرحلة التأثير الملموس على مشاريع الطاقة من المصادر المتجدّدة في العراق(Han et al., 2025: 1) .

المحور الثاني: بطاريات أيون الليثيوم Lithium ion batteries (LIBs)

(تحليل الأضرار والمخاطر وتلبية متطلبات السلامة البيئية الدولية)

أولاً: مدخل تعريفي لمفهوم بطاريات الليثيوم

بطاريات أيون الليثيوم 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) والحاسوب والبطاريات الصغيرة المستخدمة في الكثير من الأجهزة ذات الاستخدام اليومي في حياتنا كالريمونت كونترول وساعات الرأس وغيرها(Said et al., 2018: 1) . وفي هذا السياق تم وصفها بأنها (أجهزة) كونها لها وظيفة محددة وهي تخزين الطاقة الكيميائية وتحويلها إلى طاقة كهربائية عند الحاجة. كما يُعَدّ استخدامها في قطاع النقل من المحطات المهمة التي لا بد من التوقف عندها نظراً للأهمية الكبيرة لهذا القطاع وتأثيره على جميع القطاعات الاخرى (Baird et al., 2020: 1). ينبغي 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 المولّد للكهرباء يُعَدّ تفاعل (غير عكسي) ويتم انتهاء عُمر البطارية بمجرد استهلاك المواد الكيميائية فيها، **ولا يمكن اعادة شحنها**، كما في الاجهزة ذات العمر الافتراضي الطويل والتي تحتاج إلى طاقة ذات موثوقية 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 استخدامًا من بطاريات الليثيوم كما في الاستخدامات التي تم إيضاحها سابقاً، وهي قابلة لإعادة الشحن والتفريغ[1] (Ouyang et al., 2019: 1).

ثانيًا: الأضرار الحرارية ومخاطر الاشتعال والانفجار

تُصنف 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، وتُعزى أسباب جميع تلك الأضرار أساسًا إلى الفشل الذي يحصل في كل من التشغيل والإدارة، الأمر الذي يهدد السلامة البيئية والسلامة العامة (IMCA, 2022: 4).

ثالثًا: تحليل المخاطر والأضرار

يُنظر إلى الهروب الحراري (Thermal Runaway) على أنه خطر محوري يمكن أن يؤدي إلى الحريق أو الانفجار. إن التفاعل الكيميائي الذي تحفّزه الحرارة يولّد طاقة هائلة، وبذلك فإن الحصول على معلومات دقيقة حول كمية الطاقة المنبعثة يُعَدّ أمراً بالغ الأهمية من أجل تصميم أنظمة تخزين طاقة تتسم بالأمان (Said et al., 2018: 1). ومن أجل قياس الحرارة المتولّدة داخل الخلية left(P_{IHG}\right) وأيضاً الحرارة المتولّدة عن احتراق المواد المقذوفة left(P_{Flaming}\right) فقد تم تطوير تقنيات متقدمة كما هو الحال مع المسعر النحاسي للبطارية الذي يقيس معدل الحرارة أثناء عملية الشحن والتفريغ، والذي يكون مدمج مع قياس السعرات الحرارية الخاصة باستهلاك الأكسجين خصوصاً بالنسبة للأنظمة التي تتضمن خلايا ذات كثافة عالية للطاقة (Said etal., 2018: 1).

بالنسبة لبطاريات الليثيوم أيون فإن المخاطر الكيميائية قد تنشأ بشكل أساسي بسبب طبقة الحماية (الكيميائية) الموجودة على القطب السالب (واجهة الإلكتروليت الصلب - SEI)[2]، فعند تعرض هذه الطبقة إلى درجات حرارة عالية ما بين °C (100 – 70) والذي يمثّل الحد الحرج لعدم استقرار هذه الطبقة، اي بمجرد تجاوز الحد الأدنى لهذا الحد الحرج فإن طبقة الحماية تلك سوف تنهار وتتحلل، بمعنى أنه سيكون هناك تفاعل مولّد للحرارة يساهم في زيادة حرارة النظام مسببًا سلسلة من التفاعلات المدمّرة التي تقود 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 وثاني أكسيد الكربون، فضلاً عن الهيدروكربونات كالميثان، وعند تراكم هذه الغازات سيكون هناك خطرًا كبيرًا للانفجار والحريق (Baird et al., 2020: 1). أما فيما يخص بطاريات الليثيوم الأولية، فتنشأ أبرز مخاطرها الكيميائية بسبب التفاعل الذي يحصل بين الليثيوم النقي والماء المتسرب 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 وفاعلة في الأماكن المخصصة لتخزين تلك البطاريات من أجل تجنب تراكم الغازات المنبعثة وتجاوز الحد الأدنى للاشتعال (Baird et al., 2020: 21).

رابعًا: إدارة الامتثال للسلامة والبيئة

---

[1] تم تطوير أنواع حديثة من بطاريات الليثيوم مثل **بطاريات فوسفات حديد الليثيوم** (Lithium Ferrum Phosphate) (LFP) وتستخدم فوسفات الحديد والليثيوم وهي النوع الأكثر أمانًا ومقاومة للهروب الحراري وأطول عمر افتراضي (دورات الشحن العالية)، في نفس الوقت لديها كثافة طاقة منخفضة فهي تكون (أكبر حجمًا وأثقل لنفس القدرة)، التوجه نحو هذا النوع لا يزال حرجًا نظراً لتدهور سعتها في درجات الحرارة العالية (Jin et al., 2025: 1).
فضلا عن بطاريات **الليثيوم بوليمر** (Li-Po) (Lithium Polymer) وتمتاز بكثافتها العالية جداً وفي نفس الوقت خفيفة الوزن وصغيرة ومرنة من حيث التصميم، وتستخدم في التطبيقات التي تحتاج الى بطارية صغيرة الحجم وخفيفة كما في الهواتف الحديثة وغيرها، تُعد أكثر تكلفة بالمقارنة مع فوسفات الحديد، وأيضًا بسبب ارتفاع كثافة هذا النوع فإنه يحتاج الى عناية أكثر فهي عرضة للانتفاخ وكذلك الاشتعال (Jauch, 2018: 5).
بصورة عامة فإن الليثيوم أيون لا تزال الشكل الأكثر استخدامًا لبطاريات الليثيوم.

[2] **(SEI) Solid Electrolyte Interphase**

في ظل المخاطر العالية التي تنطوي على استخدام بطاريات الليثيوم ينبغي أن يتم الامتثال للإجراءات واللوائح والتشريعات والتنظيمات التشغيلية السائدة، إذ ان الفشل في تطبيق تلك الإجراءات يُعَدّ أحد أهم الأسباب المؤدية للحوادث، بالأخص فيما يتعلق بعملية 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 Regulations)[3]، 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 تشكّل تهديداً للسلامة والصحة عند النقل، كما تدرجها تحت تصنيف (البضائع الخطرة) وطبقاً إلى اللوائح المشار اليها 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

ان المخاطر البيئية الكبيرة لبطاريات الليثيوم تُحَتِّم وجود إدارة صارمة لنفاياتها، خصوصًا في مرافق المعالجة، إذ يُعَدّ عزل أطراف البطاريات من خلال استخدام شريط عازل الإجراء الوقائي الأبسط والأهم لمنع التماس الكهربائي ونشوء الحرائق سواء في عملية التخزين المؤقت أو التخلص منها فضلاً عن أن عدم وجود عملية فصل صحيحة لتلك 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: 30-51). ومن أجل أيجاد معالجة لهذا التحدي، 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، يُعَدّ هذا البرنامج مهم لتقليل 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 الالكترونية ضمن برامج النفايات الشاملة من خلال وجود إطار قانوني مناسب من أجل تحقيق الالتزام البيئي (Colorado, 2021: 2).

المحور الثالث: تحليل الانعكاسات والآثار

أولاً: مفارقة التحول الطاقي

في ظل التوجهات الدولية نحو التنمية المستدامة تبرز الطاقة بصفتها القلب النابض والمحرك الرئيس لعجلة التنمية، وفي ظل السياسات الخضراء التي تؤطّر عملية التنمية المستدامة، وما يترتب على ذلك من توجهات وضغوط دولية كبيرة لتقليل الانبعاثات الضارة والتلوث الذي يرافق عملية انتاج الطاقة من المصادر التقليدية، تتجه 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** جليًا **(المفارقة)** التي نحاول تسليط الضوء عليها، فإذا ما أخذنا بنظر الإعتبار المخاطر الحرارية العالية والتي قد تصل للحرائق والانفجارات لهذه البطاريات، سنرى 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 امكانية تحقيق الأهداف التي ترسمها خطط التنمية المستدامة والتكنولوجيا الخضراء.

ثانيًا: البعد التنظيمي والبيئي

كنتيجة لسياسات التحول نحو الطاقة المتجدّدة والنظيفة، أصبح استخدام بطاريات الليثيوم أيون مزدهرًا بشكل كبير، مما أدى إلى زيادة كبيرة في حجم النفايات الناتجة عن استخدامها، مما يُحَتّم وجود ضوابط تنظيمية حازمة تهدف إلى إدارة تلك النفايات وإيجاد طرق مناسبة للتخلص منها (United Nations, 2019: 4). وبغرض الوقاية من مخاطر الانفجار والحريق المرتبطة بها، تم إيجاد إرشادات خاصة تنظِّم 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"، بدلًا من رميها في مكبات النفايات التقليدية، فضلاً عن تقليل الأعباء التنظيمية، تم تصنيف البطاريات المستعملة ضمن "برامج إدارة النفايات الشاملة" "Universal Waste" (Environmental Protection Agency, 2023: 5).

[3] **أبرز تصنيفات الأمم المتحدة** لبطاريات الليثيوم: **3090:** بطاريات الليثيوم المعدنية (بما في ذلك بطاريات سبائك الليثيوم)، **3091:** بطاريات الليثيوم المعدنية المعبأة في المعدات أو المعبأة مع المعدات (بما في ذلك بطاريات سبائك الليثيوم)، **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).

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 المتطورة من ناحية أخرى (حمادي وآخرون، 2025: 2).

ثالثًا: تحليل العلاقة بين (بطاريات الليثيوم) و (التحول نحو الطاقة المتجدّدة)

يُعَدّ (التقطّع والتذبذب) من أبرز معوقات إنتاج الطاقة من المصادر النظيفة والمتجدّدة 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 بتكلفة 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 والفاعلية.

هذا التشابك الحيوي، والعلاقة التكاملية بين عملية إنتاج الطاقة من المصادر النظيفة والمتجدّدة وبين التقنيات الحديثة لتخزين الطاقة، على الرغم من أن ذلك يُعَدّ بمثابة الوقود الدافع لعجلة التحول في أنظمة الطاقة للوصول إلى تنمية شاملة ومستدامة، لكن في نفس الوقت فهو يساهم في زيادة الاعتماد على أنظمة تنطوي على مخاطر كامنة عالية، الأمر الذي يُحتّم 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 والمتجدّدة تقابلها زيادة ملحوظة في استخدام بطاريات الليثيوم.
2. يمثل الهروب الحراري الخطر الرئيس لبطاريات الليثيوم أيون، إذ يكون نتيجة للتفاعلات الكيميائية التي تُحَفزها بعض العوامل التشغيلية والكيميائية كالتقادم والعيوب المصنعية.
3. يرافق عملية الانهيار الحراري وجود انبعثات لبعض الغازات القابلة للاشتعال (أحادي أكسيد الكربون والهيدروجين)، بالتالي زيادة احتمال حصول الحرائق والانفجارات.
4. تعود أغلب الحوادث المرتبطة باستخدام بطاريات الليثيوم إلى عدم نجاح الإجراءات التنظيمية على صعيد عملية التعبئة ووضع العلامات الملائمة فضلاً عن تصنيفها ضمن فئة المواد الخطرة.
5. يُعد ضعف تطبيق آليات "توسيع مسؤولية المنتِج" (EPR) [4] الفاعلة والملزِمة في أغلب التشريعات، من أهم اسباب الوصول إلى مستويات عالية لحجم النفايات الخطرة لبطاريات الليثيوم، الأمر الذي يُعد بمثابة التزام بيئي (مؤجَّل) يساهم في تخفيض المزايا البيئية التي تنتج عن استخدام المصادر المتجدّدة للطاقة.
6. الكلفة السوقية لبطاريات الليثيوم (ضمن قطاع الطاقة النظيفة والمتجدّدة) ليست انعكاسًا للكلفة الحقيقية لدورة حياتها كاملةً، إذ لا تأخذ بنظر الاعتبار تكاليف الاحتواء والسلامة والتخلص الآمن وإعادة التدوير، الأمر الذي قد يشكّل عائقاً مهماً أمام التوسع في سوق الطاقة المتجدّدة.

ثانياً: التوصيات

من أجل التعامل الكفوء والفاعل مع مفارقة الليثيوم وضمان نجاح التحول الطاقي، فإن البحث يوصي بما يأتي:

1. سَن تشريع دولي **"توسيع مسؤولية المنتِج"** مُلزم وموحَّد (على صعيد نطاق التطبيق والآليات وكافة التفاصيل)، يفرض على جميع الجهات (المعنية) في قطاع الطاقة النظيفة والمتجدّدة (من الموردين إلى المشغلين) اعتماد (مسؤولية المنتِج)، وإيجاد **(صناديق ائتمان)** 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)، من خلال تطبيق "أنظمة إدارة البطارية" (BMS) [5] القائمة على الذكاء الاصطناعي التي تساعد على اتخاذ التدابير اللازمة قبل وقوع الحوادث، مع ضرورة تحديد الحدود الدنيا للاشتعال وتطوير أنظمة تهوية كفوءة لمنع تراكم الغازات.
3. ضرورة إطلاق مبادرات وطنية استراتيجية مُمَوَلة لدعم وتحفيز (البحث والتطوير) فضلاً عن (التجريب) فيما يتعلق بتقنيات تخزين الطاقة المستدامة ذات الموثوقية العالية والمخاطر المنخفضة من أجل خلق مرونة 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 الآمن لهذا النوع الخطِر من النفايات، وبالتالي تعزيز الجانب البيئي، فضلاً عن تعزيز الجانب الاقتصادي من خلال الاستخلاص الفاعل للمواد القيّمة.

---

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

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

5. الضـرورة القصـوى لإيجاد آلية وطنية واضـحة داخل العراق لتنظيم العمل فيما يخص جمع نفايات بطاريات الليثيوم كخطوة أولى، فضـلاً عن أهمية إيجاد وسـائل 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 اي 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 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

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.