مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية_ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (3) العدد (٥) 2019
Tartous University Journal for Research and Scientific Studies- Engineering Sciences Series Vol. (3) No. (5) 2019

معالجة نهاية حياة تجهيزات نظم الطاقة الكهروشمسية والكهروريحية بإعادة التدوير

علي خضور*

(تاريخ الإيداع ٢٥ / ٧ / ٢٠١٩ . قُبل للنشر ٨ / ٩ / ٢٠١٩)

الملخص

إن التوسع المستمر بصناعة نظم الطاقة المتجددة الكهروشمسية أو نظم طاقة الرياح، وتركيبها يلعب دوراً جوهرياً بتشاركية هذه الطاقات في ميزان الطاقة المتاح محلياً وعالمياً على مدى دورة حياة كاملة، ولكن بدرجة أقل مقارنة بمصادر الطاقة التقليدية، فإن نظم الطاقة المتجددة ستنتج نفايات كهربائية أو ميكانيكية صلبة، ينبغي التحضير للتعامل معها وفق الطرق المعتمدة عالمياً أو وفق طرق مطورة محلياً متوافقة، وفي مقدمة هذه الطرق تلك التي تندرج تحت مصطلح إعادة التدوير بما يحقق مبدأ الاستدامة لهذه المصادر الواعدة.

تتجسد أهمية هذا الموضوع بالتركيز على ضرورة اعتماد أساليب فنية علمية وسن تشريعات محلية تكفل التخلص من نفايات هذه النظم، خصوصاً في مرحلة نهاية دورة حياتها بما يعزز الأمن البيئي والطاقوي.

و بناءً عليه، ينبغي اعتماد هذه الإجراءات التقنية لجهة إعادة تدوير تجهيزات نظم الطاقة المتجددة في الإستراتيجية الوطنية لإعادة إعمار قطاع الطاقة السوري.

الكلمات المفتاحية: نظم الطاقة الكهروشمسية وطاقة الرياح – نفايات كهربائية وميكانيكية– دورة الحياة– إعادة التدوير – الأمن البيئي والطاقوي.

*دكتور في قسم هندسة تقانات الطاقات المتجددة– كلية الهندسة التقنية – جامعة طرطوس

مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية_ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (3) العدد (٥) 2019
Tartous University Journal for Research and Scientific Studies- Engineering Sciences Series Vol. (3) No. (5) 2019

End-of-Life Treatment of Solar- Electric and Wind Electric Energy Systems Equipment Using Recycling

Ali khaddour*

(Received 25 / 7 / 2019 . Accepted 8 / 9 / 2019)

Abstract

The continuous expansion of the manufacture and installation of renewable electro-electric or wind energy systems plays a key role in the sharing of these energies in the energy balance available locally and globally. Over a full life cycle, but to a lesser extent compared to traditional energy sources, renewable energy systems will produce solid electrical or mechanical waste, which should be prepared to deal with them in accordance with internationally adopted methods or compatible locally developed methods. The term recycling to achieve the sustainability of these promising sources.

The importance of this subject is highlighted by focusing on the need to adopt scientific techniques and enact local legislation to ensure the disposal of waste of these systems, especially at the end of their life cycle, thus enhancing environmental and energy .security

Accordingly, these technical measures should be adopted for the recycling of renewable energy systems equipment in the National Strategy for the Reconstruction of the Syrian Energy Sector.

Key Words: Solar-electric and wind-electric energy systems - electrical and mechanical waste - life cycle - recycling - environmental and energy security.

*Prof. Assis. at Tartous University-Renewable Energies Technologies Engineering Department

مقدمة:

إن التوسع المستمر بصناعة النظم الكهروضوئية والكهروريحية يلعب دوراً أساسياً بتشاركية الطاقة الشمسية في ميزان الطاقة المتاحة عالمياً، على مدى دورة حياة كاملة؛ ولكن بدرجة أقل مقارنة بمصادر الطاقة التقليدية، فإن النظم الكهروضوئية تليها النظم الكهروريحية تنتج نفايات صلبة.

الشكل (1): خريطة طريق دورة حياة التجهيزات في الواقع العملي (تصنيع–توزيع– استعمال– تخلص– مادة خام).

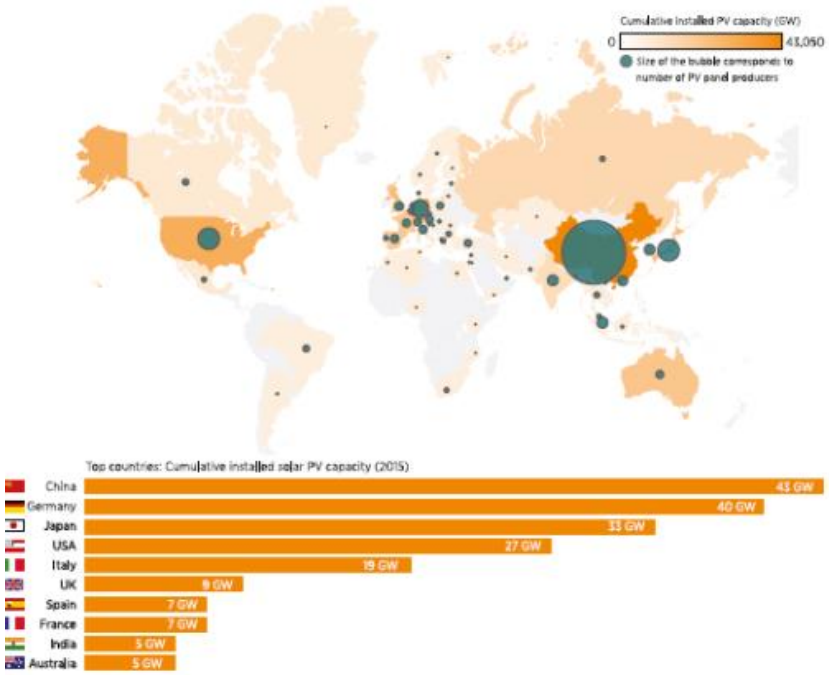
في هذه الدراسة سيتم توضيح الحاجة الملحة لسياسات إعادة تدوير تجهيزات النظم الكهروضوئية الشمسية والكهروريحية، لا سيما البطاريات الشمسية قلب نظام الطاقة الشمسية المتجددة؛ لما تحويه تجهيزات مثل هذه النظم على مواد ضارة، والتي تضاهي بخطرها باقي أجزاء النظام، علماً أن طريقة التخلص في بلادنا من النفايات الكهربائية والإلكترونية لا يتبع في مراحله الطرق المتبعة عالمياً من المصدر (مصانع أو مستهلك) إلى المصب (مكبات القمامة). كما سيتم طرح نموذج رياضي مبسط يعطي التخمين الرياضي لكمية النفايات الإلكترونية يساعد في وضع تدابير كمية لمجابهة خطر النفايات في المستقبل.

تشير نتائج الأبحاث العالمية في هذا السياق إلى ضرورة سن قوانين وتشريعات تعزز سياسات إعادة تدوير نظم الطاقات المتجددة، خصوصاً في دول العالم الثالث التي باتت منفتحة لهذا النوع من الطاقات؛ مما يعزز الأمن البيئي بما يرتبط بعدم تلوث المياه باعتبارها متطلباً أساسياً للحياة، ومن جهة أخرى تحقيق الأمن الطاقوي[1,2,3,4,5,6,7] .

تحدي النفايات الإلكترونية والكهربائية (و منها البطاريات والألواح الكهروشمسية ومكونات العنفات الريحية):

إن النفايات الكهربائية والإلكترونية تمثل أسرع تدفق سنوي للنفايات في العالم يقدر بـ 50–20 مليون طن، وباعتبار دول العالم الثالث أو الدول النامية جزءاً من المجتمع المعلوماتي العالمي، يقتضي هذا وجود كميات متزايدة من النفايات الإلكترونية والكهربائية لدى هذه الدول. بالتالي تتزايد ضرورة حلول مسؤولة لجهة إعادة التدوير وإعادة

الاستخدام. بالمقابل فإن دولنا ينقصها البنية التحتية، و(know–how/الخبرة)، والتشريعات الناظمة لإعادة الاستخدام والتدوير الآمن للنفايات الضارة. تحتوي النفايات الإلكترونية (e–waste) بما فيها الألواح الكهروشمسية نسبةً من المواد الضارة (مثل المعادن الثقيلة كالزئبق والرصاص وغير ذلك)، التي يمكن أن تتسرب إلى المياه الجوفية في حال تم التخلص من تلك النفايات في مكبات القمامة التقليدية، أو يمكن لهذه النفايات أن تُلوث في حال تحولها إلى رماد. بالمقابل يمكن أن تحتوي مثل هذه النفايات معادنَ إستراتيجية مهمة كالذهب والنحاس والفضة. للعلم فإن أقل من 1% من النفايات الإلكترونية يدور في الدول النامية بشكل آمن ومفيد.



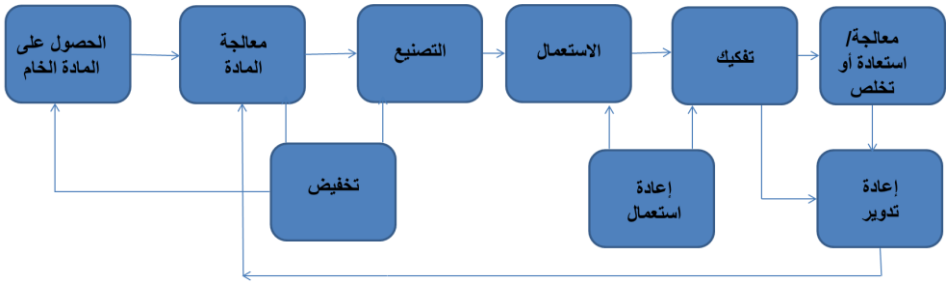
الشكل (٢): نظرة عالمية عامة عن منتجي الألواح الكهروضوئية الشمسية والسعة التراكمية المركبة لها.

إن التعقيد في حالة النظم الكهروشمسية والكهروريحية يتجلى بوجود مكونات متعددة في النظام كالألواح والبطاريات واللمبات والمعرجات (inverters) واللمبات بأنواعها وغير ذلك من مكونات صلبة ومركبة للعنفات الريحية، والخطورة تبرز بعد نهاية دورة حياة هذه الأجهزة. فالألواح الشمسية والبطاريات تدخل دورة النفايات في أزمنة مختلفة: فالألواح بعد أكثر من 25سنة والبطاريات عادة في غضون خمسة سنوات. بالتالي مقدار النفايات المتولدة هي مختلفة، ومكوناتها تحتاج معالجة خاصة لتجنب تأثيراتها البيئية. إضافة إلى ذلك فإن هناك بالنسبة إلى البطاريات تراكم سابق في الخبرة عند إعادة التدوير كون البطاريات مستخدمة في السيارات منذ زمن بعيد، بينما الخبرة في إعادة تدوير الألواح الكهروشمسية ما زالت قيد التطوير ولا يوجد تاريخ سابق في التعامل معها.

معظم الدول تصنف الألواح الكهروشمسية كنفايات صناعية عامة. حالياً فقط الاتحاد الأوربي (EU) قام بوضع قوانين ناظمة لنفايات الألواح الكهروشمسية [8,9,10].

دواعم إدارة النفايات:

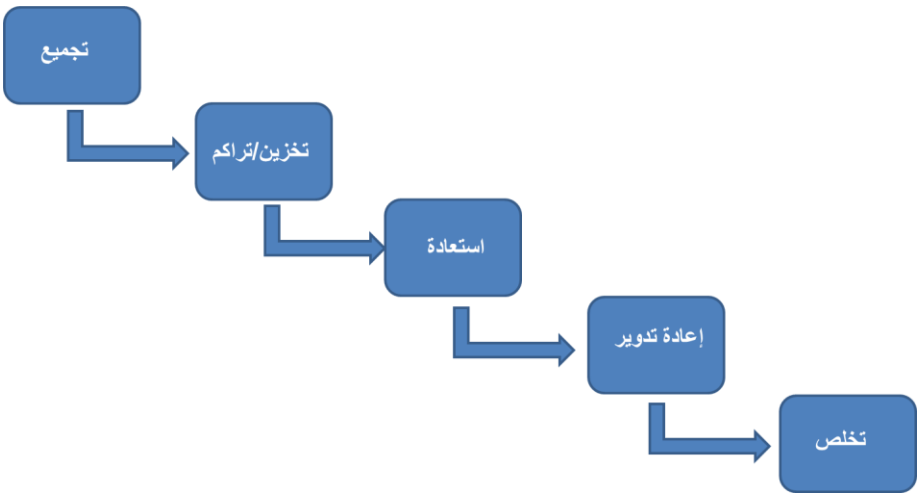
منهجية دورة الحياة (Life Cycle) هي مسار ذو قيمة في مسألة إدارة النفايات، بشكل مستقل عن نوع هذه النفايات. ودواعم دورة الحياة لكل من الألواح والبطاريات هم المنتج والموزع والمستهلك والقائم بإعادة التدوير.



الشكل (٣): مراحل دورة حياة الألواح الكهروشمسية والبطاريات.

عملية إدارة النفايات:

إن مراحل عملية إعادة التدوير لمكونات الألواح الكهروشمسية والبطاريات هي مشابهة إلى حد كبير مثيلاتها من عمليات ومراحل إعادة التدوير للنفايات الإلكترونية والكهربائية المعروفة.

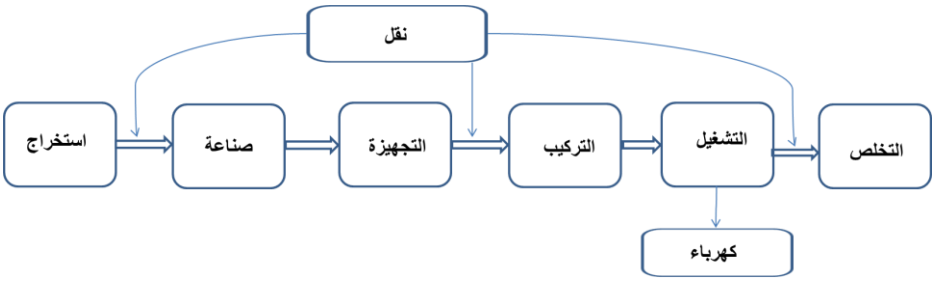


الشكل (٤): عملية إدارة النفايات لإعادة تدوير الألواح الكهروشمسية والبطاريات.

في العملية، تجمع البطاريات والألواح من مناطق إنتاجها إلى مراكز تجميع مركزية حيث تكون تنطلق المعالجة الأولى كبداية. بعد مرحلة المعالجة الأولى هذه والتي تفصل عادة منتج النفايات إلى مجموعة مواد (مثل المعادن والبلاستيك والزجاج)، في حالة الألواح الكهروشمسية هناك معالجة أخرى ضرورية لتدفقات المادة على اختلافها من أجل الاستعادة وإعادة التدوير. أخيراً، فإن التخلص من الأجزاء غير القابلة لإعادة التدوير أو الغير قابلة لإعادة الاستخدام يحتاج أيضاً أن يؤخذ بالاعتبار حسب الأنظمة المعتمدة وهذا يرتبط أيضاً بالدعم المالي اللازم لتشغيل النظام أو لإنهاء العملية في مستوى التجميع ومستوى المعالجة، وذلك على المستويين المحلي والوطني [11,12,13,14,15,16,17,18].

حدود تخمين دورة الحياة:

من الواضح أن استخدام حدود مختلفة يخلق نتائج مختلفة، كما أن الإحاطة بهذه الحدود أمر بالغ الأهمية. ويبين الشكل ٥ حدوداً نموذجية لتخمين دورة حياة (LCA: Life Cycle Assessment) نظام كهروشمسي من مرحلة استخراج المواد الأولية اللازمة إلى مرحلة التخلص النهائية من النفايات. الاعتبار الآتي هو الحدود لكل مرحلة. وتشمل الحدود المنتجات والخدمات المتعلقة بدورة حياة العنصر. كما تختلف التفاصيل في كل حالة، من المهم أن نوائم التوصيف مع الغرض من المنتج. على سبيل المثال، العوامل المباشرة متضمنة نوع اللوح الكهروشمسي المستخدم، والكفاءة، والمصفوفة الشمسية، والأساسات، وطريقة التركيب، وطريقة التشغيل، والتي يجب أن يتم تحديدها لبناء نظام مناسب، كما ينبغي أيضاً النظر في العوامل غير المباشرة قدر الإمكان.



الشكل (٥): حدود الـ LCA (تخمين دورة الحياة) لأجل نظام كهروضوئي شمسي.

العمر أو زمن الحياة (Lifetime):

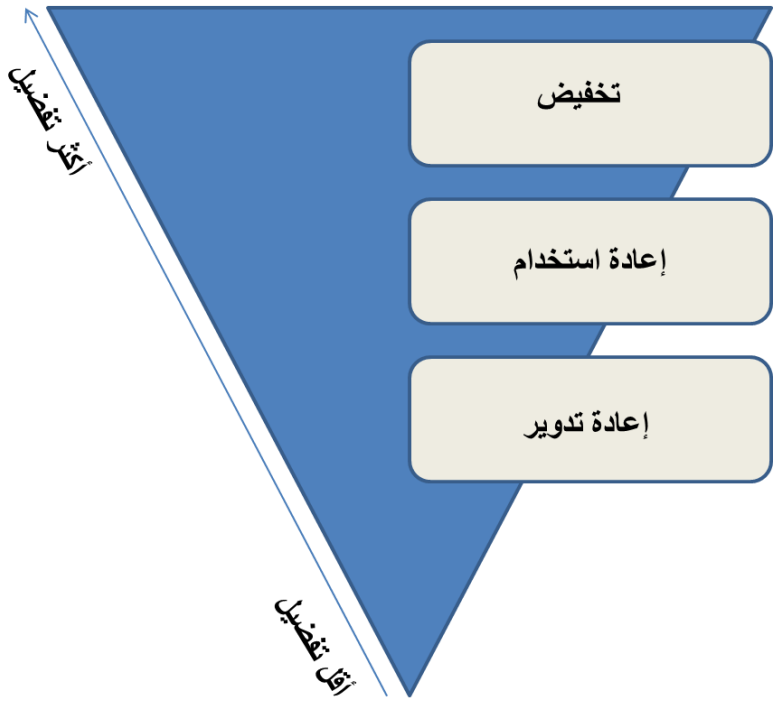
من الصعوبة بمكان تحديد العمر الزمني للنظم الكهروشمسية لكون معظمها مازال قيد التشغيل، أو أنها أنتجت في مراحل مبكرة (وفق تقنيات ما زالت قيد التطوير). كثير من الباحثين ركزوا على دراسة متوسط العمر الزمني للنظم الكهروشمسية، ويمكن تلخيص ما توصلوا إليه في هذا السياق في الجدول الآتي:

الجدول (1): جدول العمر أو زمن الحياة.

PV Modules/ألواح كهروشمسية	**30 سنة**
Inverters/معرجات	15 سنة (لمحطات صغيرة أو لنظم سكنية)، و 30 سنة مع 10% تبديل جزئي كل 10 س وات للمحطات الضخمة.
Structure/ الهيكل	30سنة للوحدات المركبة على الأسطح والواجهات، وما بين 30 إلى 60 سنة للتركيبات المحمولة على دعائم معدنية مستندة على الأرض.
Cabling/الكابلات	30 سنة

إدارة نهاية حياة النظم الكهروضوئية:

تقدم إدارة نهاية حياة النظم الكهروضوئية فرصاً متعلقة بالمنهجية الثلاثية المشهورة والمسماة بالـ (three R_S=Reduce+Reuse+Recycle) للإدارة المستدامة للنفايات.



الشكل (٦): الخيارات المفضلة لإدارة النفايات الكهروشمسية.

و تعتبر هذه المنهجية واحدة من أفضل الوسائل للتعامل مع النفايات، بحيث نقلل (Reduce) من المواد الداخلة في عملية التصنيع وخصوصاً الضارة منها، ثم إعادة استخدام (Reuse) ما يمكن استخدامه من المواد والمنتجات، وأخيراً إعادة تدوير (Recycle) ما يمكن تدويره من النفايات والمخلفات عن طريق إعادة تصنيعها أو إدخالها في صناعات أخرى. ويعتبر هذا الأسلوب من الوسائل الذكية لرفع جودة المنتج وتقليل التكاليف والمحافظة على البيئة بما يحقق مبدا التنمية المستدامة.

تخمين دورة حياة العنفات الريحية:

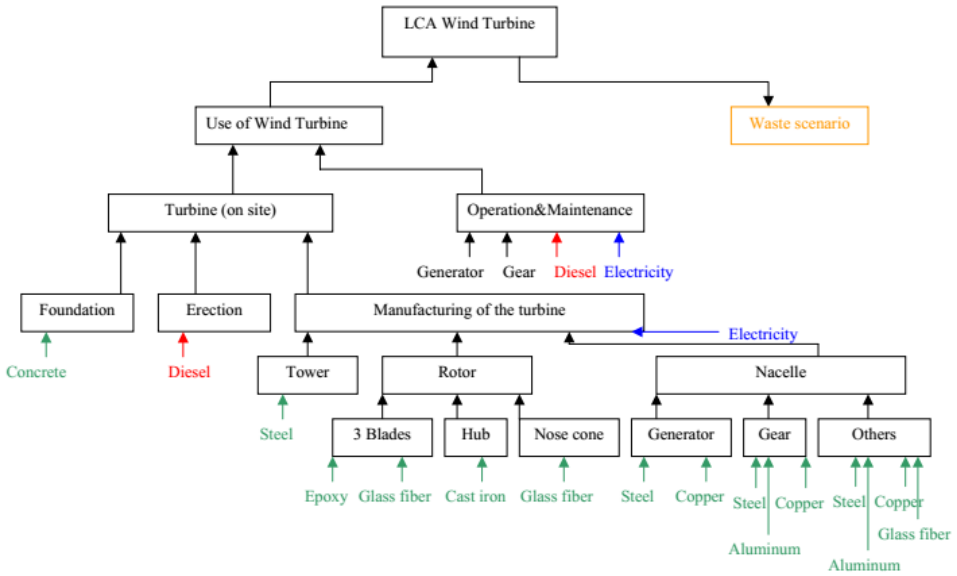
إن تخمين دورة حياة طاقة الرياح يمكن تصنيفه في خمس مراحل:

١)التركيب: يتضمن إنتاج المواد الخام (الخرسانة والألمنيوم والصلب والألياف الزجاجية وما إلى ذلك) اللازمة لتصنيع البرج والحاوية والصرة والمحور والشفرات والأساسات وكابلات توصيل الشبكة.
٢)التجميع والتركيب الموقع: يشمل أعمال تركيب توربين الرياح. ويمكن تضمينها في أطوار النقل والتركيب.

٣)النقل: وتشمل نظم النقل الخاصة بنقل المواد الخام بقصد إنتاج أجزاء النظام، إضافة إلى تأمين نقل وإحضار باقي المكونات لمكان تركيب العنفة أو المزرعة الريحية.

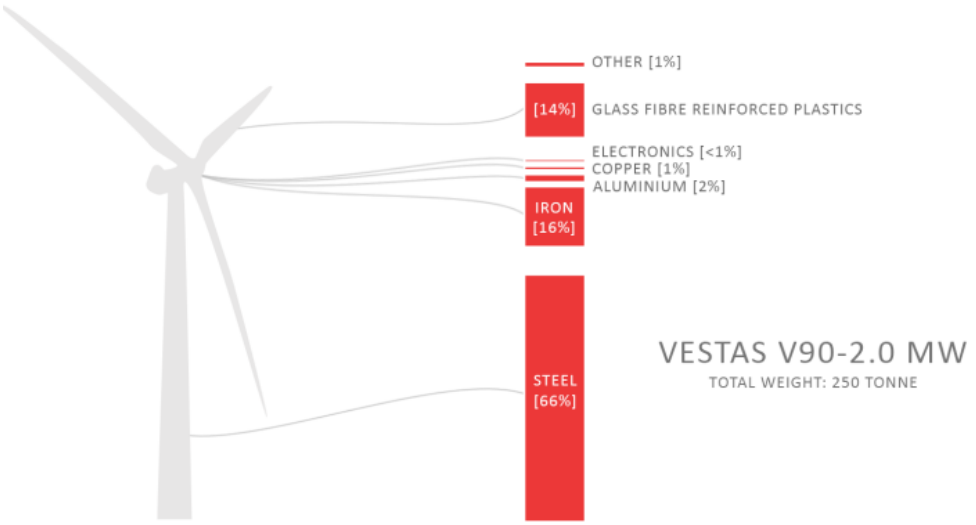
٤)التشغيل: ترتبط العملية بصيانة التوربينات، بما في ذلك تغييرات الزيت والتشحيم والنقل لأغراض الصيانة.

٥)التفكيك: يتم بمجرد أن يكون توربين الرياح خارج الخدمة، عندئذ تتم أعمال تفكيك التوربينات والنقل (بالشاحنات) من منطقة نصب البرج إلى موقع التخلص النهائي، يرافق هذا السيناريو عمليات إعادة تدوير بعض المكونات، وإيداع المكونات الخاملة في مدافن النفايات واستعادة المواد الأخرى مثل زيت التشحيم.



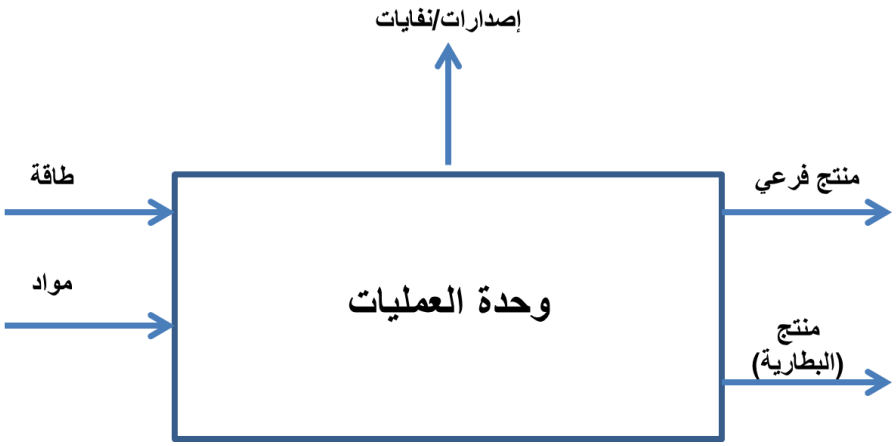
الشكل (٧): إجراءات تخمين دورة حياة العنفات الريحية.

إن وزن عنفة رحية مفردة يمكن ان يصل إلى عدة مئات من الأطنان، كما تتباين المواد المستخدمة وفقاً للتوضع والمصنع والتصميم والسعة. ومعظم العنفات الريحية الكهربائية ثلاثية الشفرات، حيث يوضح الشكل الآتي المكونات الشائعة المستخدمة في صناعة المكونات الرئيسة.



الشكل (٨): نسب المواد الشائعة في العنفات الريحية.

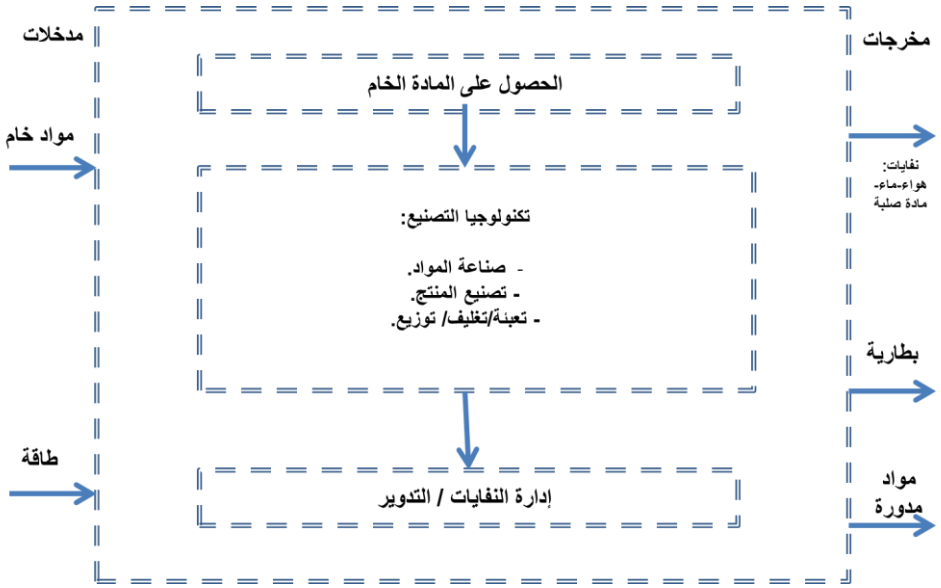
معيار تخمين دورة حياة البطاريات:



الشكل (٩): وحدة المعالجة العامة.

يعد قياس كمية المادة وتدفقات الطاقة في دورة حياة المنتج (البطارية التي تعد قلب نظام الطاقة المتجدد) بمثابة عملية جرد لدورة حياة البطارية (LCI: LIFE CYCLE INVENTORY). على سبيل المثال: العديد من العمليات المتعلقة مثلاً بصناعة بطارية نوع يطلب من وحدة العمليات في هذه الحالة إنتاج الرصاص والأسيد والحاوية والأقطاب والفواصل والنحاس وباقي المكونات بحيث يكون الهدف هو تجميع المنتج النهائي أو البطارية بحيث تكون جاهزة للشراء.

الشكل (١٠) يعطي وصفاً متكاملاً (دورة حياة كاملة) للمنتج: إنتاج مواد البطارية وتصنيع البطارية وإعادة تدويرها.



الشكل (١٠): حدود النظام والأنشطة ذات الصلة بصناعة البطارية مع إعادة تدوير المنتج.

بالنتيجة، ومع الالتزام بمعايير جودة البطاريات إلا أنه يبقى هناك نقص معتبر في المعلومات المتوفرة عن ماهية بعض المكونات الداخلة في الإنتاج الأولي للمكونات، أو في المواد المدورة، مما قد يقلل من وثوقية بعض البيانات المكتوبة على اللوحة الاسمية للبطاريات.

أخيراً، فإن الأعباء البيئية المخفضة لإنتاج البطارية والتي تستخدم المواد المعاد تدويرها يمكن أن تقلل بشكل كبير من الأثر البيئي. بالتالي توفر معطيات أكثر عن المواد الداخلة في عملية الإنتاج له أهميته وضرورته.

التخمين الرياضي لكمية النفايات الإلكترونية:

قدر الإنتاج العالمي في عام ٢٠٠٦ من النفايات الإلكترونية العالمية بحدود ٢٠-٥٠ مليون طن / سنة.

$$E = MN / L \qquad (١)$$

E: الإنتاج السنوي للنفايات الإلكترونية (kg/year).

M: كتلة البند الإلكتروني (kg).

N: الكمية أو عدد الوحدات.

L: دورة الحياة الوسطية (year).

تشكل الحواسب والتي تملك عمراً وسطياً يقدر بثلاث سنوات، الجزء الأعظم من مجمل نفايات التجهيزات الكهربائية والإلكترونية، مقارنة بالبرادات أو المجمدات والأفران الكهربائية التي تملك عمراً وسطياً يقدر بـ ١٠-١٢ سنة

يبيِّن الجدول ١ عرضاً لبعض التجهيزات الكهربائية والإلكترونية مع تقدير لعمرها الوسطي ووزنها.

الجدول ١: بعض التجهيزات الكهربائية والإلكترونية مع تقدير لعمرها الوسطي.

نوع التجهيزة	الوزن التقريبي (kg)	العمر الوسطي (year)
كومبيوتر	٢٥	٣
مكواة	١	١٠
مجفف شعر	١	١٠
غلاية	١	٣
تلفون	١	٥
موبايل	0,1	٢
مكنسة كهربائية	١٠	١٠
جلاية	٥٠	١٠
راديو	٢	١٠
ميكروويف	١٥	٧
غسالة	٦٥	٨

الخاتمة والتوصيات:

في ظل الانتشار الواسع في العقود الأخيرة للنظم الكهروشمسية، تزايد الاهتمام إذن بالتأثير البيئي والصحي لإدارة النفايات المرتبطة بالمكونات المختلفة لهذه النظم، وبناءً على ما تقدم في الورقة العلمية نخلص إلى ما يلي:

- ضرورة إدراج معايير الجودة خصوصاً المرتبطة بجهة الإنتاج، وبما يرتبط بزيادة حياة الألواح والبطاريات الشمسية وضرورة الالتزام بإعادة تدويرها وفق القوانين والنظم النافذة.
- عملية تخمين دورة حياة نظم طاقة الرياح وما يرتبط بها من إجراءات إعادة التدوير ستكون ذات عائدية بيئية واقتصادية مستقبلية عظمى، خصوصاً في حال تركيب مزارع ريحية ضخمة في المستقبل بما سيحقق الأمن البيئي والطاقوي ويضمن مبدأ الاستدامة.

- يمكن ربط تدابير معالجة نهاية حياة النظم الكهروضوئية بحلقة مغلقة مع مصانع ومواقع تجميع مكونات هذه النظم ما يضمن أيضاً عائدية اقتصادية وبيئية كبيرة.
- ضرورة حظر عمل الورشات غير المرخص لها بالعمل في قطاع إعادة التدوير.
- تحضير وإدارة برامج تأهيل وتدريب لمختصين سيعملون في منشآت إعادة التدوير المزمع إنشاؤها.
- وضع مكافآت للأسر والقطاعات الصناعية والتجارية تشجع على الالتزام بالتعامل الصحيح مع البطاريات في نهاية عمرها وتسليمها للهيئات المرخص لها رسمياً.
- هناك فرصة سانحة لتطوير الخبرات الوطنية في مجال إعادة التدوير بالتعاون مع المراكز البحثية الوطنية ، مع ضرورة الاستفادة من الخبرات الأجنبية في هذا المجال، مع التنويه لأهمية الإعلام المحلي بكافة وسائله المتاحة للفت الانتباه لهذا الموضوع الحيوي الذي له منعكساته المهمة على الوعي والأمن البيئي والصحي.

المراجع:

1- National Electronics Recycling Infrastructure Clearinghouse (NERIC). 2010. *Current Electronics Recycling Laws in Effect.* [Online] Available at: http://www.ecyclingresource.org/ContentPage.aspx?Pageid=28&ParentID=0 [Accessed 19 February 2010].

2- Nnorom, I.C., & Osibanjo O., 2008. *Overview of electronic waste (e-waste) management practices and legislations, and their poor applications in the developing countries. Resources,* Conservation and Recycling 52 (2008), p. 843-858.

3- Pratap, A., 2009. *Interview on e-waste in India and the Basel Ban. [Interview]* (Personal communication, 14 December 2010).

4- Raghupathy, L., 2009. *Interview on e-waste in India and the Basel Ban.* [Interview] (Personal communication, 9 December 2010).

5- Schwarzer S., A.D. Bono et al, *'e-waste, the hidden side of IT equipment's manufacturing and use', Environment Alert*

Bulletin (UNEP Early Warning on Emerging Environmental

Threats), No. 5, 2005.

6- Tom Young, 'e-waste a growing problem for China and India',

22 February, 2010.

7- SPE, Solar Power Europe. "*Global Market Outlook for Solar Power 2016 - 2020.*" Brussels, 2016.

8- SWEEPNET. *Report on the Solid Waste Management in Morocco.* GIZ, 2014.

9-Tür Maria, Manhart Andreas, and Scheleicher Tobias. *Generation of used lead-acid batteries in Africa - estimating the volumes. Freiburg:* Öko-Institut e.V., 2016.

10-World Bank. *"Implementation completion and result report. Rural Electrification and Renewable Energy Development Project. The People's Republic of Bangladesh."* 2013.

11-Jungbluth, N. (2005). *Life cycle assessment of crystalline photovoltaics in the Swiss ecoinvent database. Prog. Photovolt.:* Res. Appl. 13(5), 429–446.

12-Kaczmar, S. (2011). *Evaluating the read-across approach on CdTe toxicity for CdTe photovoltaics, paper presented at the Society of Environmental Toxicology and Chemistry North America* 32nd Annual Meeting, Boston, MA.

13-Kaldellis, J.K., Zafirakis, D., and Kondili, E. (2010). *Energy pay-back period analysis of stand-alone photovoltaic systems.* Renew. Energy 35, 1444–1454.

14-Kammen, D., Nelson, J., Mileva A., and Johnston, J. (2011). An Assessment of the Environmental Impacts of Concentrator Photovoltaics and Modeling of Concentrator Photovoltaic Deployment Using the SWITCH Model (Berkeley, CA: Renewable and Appropriate Energy Laboratory, Energy and Resources Group, University of California at Berkeley). www.cpvconsortium.org/Portals/0/Berkeley_CPV_Environmental%20Report (accessed March 28, 2012).

15-Kato, K., Murata, A., and Sakuta, K. (1997*). An evaluation on the life cycle of photovoltaic energy system considering production energy of off-grade silicon*. Solar Energy Mat. Solar Cells 47, 95–100.

16-Kaygusuz, K. (2009). *Environmental impacts of the solar energy systems. Energy Sources Part* A: Recovery Util. Environ. Eff. 31(15), 1376–1386.

17-Laleman, R., Albrecht, J., and Dewulf, J. (2011). *Life cycle analysis to estimate the environmental impact of residential photovoltaic systems in regions with a low solar irradiation. Renew.* Sustain. Energy Rev. 15(1), 267–281.

18-Leitner, A., Platts Research and Consulting, *National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2002). Fuel from the Sky: Sola*r Power's Potential for Western Energy Supply, NREL/SR-550-32160 (Lakewood, CO: National Renewable Energy Laboratory).