

تطوير إطار كمي لتقييم استدامة مشاريع الطاقة الشمسية في الدول النامية: تطبيق مقارنة على ثلاثة مشاريع وطنية في ليبيا

جمال عبد الرحمن الطيف الصغير^{1*}, أسامة حسين جمعة أبوزيتونة²

¹كلية صرمان للعلوم والتقنية، صرمان، ليبيا
²كلية هندسة الموارد بئر الغنم، جامعة الزاوية، ليبيا

*Jamal-esghaer@scst.edu.ly

الملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تطوير إطار كمي متكامل لتقييم استدامة مشاريع الطاقة الشمسية في الدول النامية، وتطبيقه مقارنة على ثلاثة مشاريع وطنية في ليبيا تختلف في وظائفها التشغيلية والتنموية. يتكون الإطار من خمسة أبعاد رئيسية هي: الفني، والاقتصادي، والبيئي، والاجتماعي، والحوكومي، ويعتمد على مؤشرات أداء مستدام تُحوّل إلى مقياس موحد يتراوح بين صفر وواحد. استخدمت الدراسة عملية التحليل الهرمي لتحديد الأوزان النسبية، والتطبيق الخطي لتوحيد وحدات القياس، ثم جُمعت النتائج في مؤشر مركب للاستدامة. شملت حالات الدراسة مشروع منظومات كهروضوئية للمناطق النائية، ومشروع محطات لقياس الإشعاع الشمسي، ومشروع منظومات شمسية للمراكز الصحية. أظهرت النتائج أن مشروع المراكز الصحية حقق أعلى قيمة لمؤشر الاستدامة المركب، يليه مشروع المناطق النائية، ثم مشروع محطات القياس. ومع ذلك، تتطلب المقارنة تفسيراً حذراً بسبب اختلاف وظائف المشروعات، ولا سيما أن محطات القياس تؤدي وظيفة تمكينية ولا تنتج الكهرباء مباشرة. وتخلص الدراسة إلى أن الإطار المقترح يمكن أن يدعم قرارات التخطيط والتمويل، شريطة توثيق مصادر البيانات وإظهار خطوات الحساب واختبار الحساسية بصورة قابلة لإعادة الإنتاج.

الكلمات المفتاحية: استدامة الطاقة، الطاقة الشمسية، مؤشرات الأداء، التحليل الهرمي، مؤشر الاستدامة المركب، ليبيا.

Submitted: 12/08/2026

Accepted: 28/09/2026

Abstract

This study develops a quantitative framework for assessing the sustainability of solar energy projects in developing countries and applies it comparatively to three national projects in Libya with different operational and developmental functions. The proposed framework consists of five dimensions: technical, economic, environmental, social, and governance.

It uses sustainable performance indicators that are normalized on a common scale ranging from zero to one. The Analytic Hierarchy Process is applied to determine the relative weights of the dimensions and indicators, after which the results are aggregated into a Composite Sustainability Index.

The case studies include a photovoltaic rural electrification project, a solar radiation measurement stations project, and a project involving the installation of solar systems in healthcare facilities. The results indicate that the healthcare facilities project achieved the highest Composite Sustainability Index, followed by the rural electrification project and the measurement stations project. However, the results should be interpreted cautiously because the projects perform different functions, particularly because the measurement stations project does not directly generate electricity but supports future solar energy planning.

The study concludes that the proposed framework can support planning and financing decisions, provided that data sources, calculation procedures, and sensitivity analysis are fully documented and reproducible.

Keywords: energy sustainability, solar energy, performance indicators, Analytic Hierarchy Process, Composite Sustainability Index, Libya.

1. المقدمة

تُعد مشاريع الطاقة الكهربائية من الركائز الأساسية لتحقيق التنمية الاقتصادية والاجتماعية في الدول النامية، إذ ترتبط بصورة مباشرة بتحسين مستوى المعيشة، ودعم الأنشطة الإنتاجية، وتوسيع فرص الوصول إلى الخدمات الأساسية. ومع ازدياد الطلب على الطاقة، وتنامي التحديات المرتبطة بندرة الموارد والضغط البيئي وارتفاع تكاليف التشغيل، لم يعد تقييم مشاريع الطاقة الشمسية مقتصرًا على الكفاءة الفنية أو الجدوى المالية، بل أصبح من الضروري تبني منظور شمولي يراعي الأبعاد الاقتصادية والبيئية والاجتماعية والحوكومية ضمن إطار متكامل (Afgan and Carvalho, 2000; Afgan et al., 2000).

وقد تطور الاهتمام العلمي بتقييم استدامة نظم الطاقة من النماذج التي تركز على مؤشرات منفردة إلى أطر متعددة الأبعاد تجمع بين المؤشرات الفنية والاقتصادية والبيئية والاجتماعية والمؤسسية. وتؤكد الأدبيات أن استدامة مشاريع الطاقة لا يمكن الحكم عليها من خلال مؤشر واحد، وإنما تتطلب مجموعة مترابطة من المؤشرات التي تعكس أداء المشروع خلال مراحل التخطيط والتنفيذ والتشغيل والتقييم (Liu, 2014; Pohekar and Ramachandran, 2004).

وتزداد أهمية هذا التوجه في الدول النامية بسبب محدودية الموارد المالية والفنية، وضعف قواعد البيانات، وتفاوت القدرات المؤسسية، وعدم استقرار البيئة التنظيمية في بعض الحالات. كما أن استيراد أطر تقييم صُممت في اقتصادات متقدمة قد لا يعكس بصورة كافية الأولويات المحلية، مثل توسيع الوصول إلى الكهرباء، وتحسين الخدمات الأساسية، وتعزيز الاعتماد على القدرات المحلية. ولذلك فإن بناء إطار قابل للتطبيق في السياق المحلي يمثل حاجة بحثية وعملية مهمة (Ilskog, 2008; Mainali et al., 2014).

وفي ليبيا، تبرز الطاقة الشمسية بوصفها أحد البدائل الواعدة لدعم أمن الطاقة وتحسين موثوقية الإمداد الكهربائي، خصوصًا في المناطق النائية والمنشآت الصحية. كما أن طبيعة الإشعاع الشمسي في ليبيا توفر فرصًا مناسبة لتطبيقات الطاقة الكهروضوئية ومحطات القياس والتخطيط لمشروعات الطاقة الشمسية. وقد شهدت السنوات الأخيرة تنفيذ عدد من المشاريع المرتبطة بالمنظومات الكهروضوئية وقياس الإشعاع الشمسي، إلا أن تقييم استدامة هذه المشاريع لا يزال بحاجة إلى إطار كمي موحد يتيح المقارنة بين الأبعاد المختلفة للمشروع يأخذ في الحسبان اختلاف أهدافه ووظائفه التشغيلية.

وتتمثل مشكلة البحث في غياب إطار كمي متكامل يتيح تقييم استدامة مشاريع الطاقة الشمسية في الدول النامية على مستوى المشروع، مع مراعاة الأبعاد الفنية والاقتصادية والبيئية والاجتماعية والحوكومية. وعليه، تهدف هذه الدراسة إلى تطوير إطار كمي يعتمد على مؤشرات الأداء المستدام، وتطبيقه على ثلاثة مشاريع وطنية في ليبيا، مع اختبار مدى ملاءمته للمقارنة ودعم عملية اتخاذ القرار.

وتتمثل أسئلة الدراسة في الآتي:

1. ما الأبعاد والمؤشرات المناسبة لتقييم استدامة مشاريع الطاقة الشمسية في السياق الليبي؟
2. كيف يمكن تحديد الأوزان النسبية للأبعاد والمؤشرات؟
3. ما مدى صلاحية مؤشر مركب لمقارنة مشروعات تختلف في وظائفها التشغيلية؟
4. هل يبقى ترتيب المشاريع ثابتًا عند تغيير أوزان الأبعاد؟

2. منهجية البحث وتطوير النموذج

2.1 تصميم البحث

اعتمدت الدراسة على منهج وصفي-تحليلي قائم على دراسة الحالة. ويجمع هذا المنهج بين مراجعة الأدبيات، وتحديد مؤشرات الاستدامة، وبناء نموذج كمي، ثم تطبيقه على ثلاثة مشاريع شمسية في ليبيا.

ونظرًا لاختلاف الوظائف الأساسية للمشروعات الثلاثة، صُنفت المؤشرات إلى ثلاثة أنواع:

- مؤشرات مشتركة: يمكن تطبيقها على جميع المشروعات.
 - مؤشرات إنتاجية: تخص المشروعات التي توفر الكهرباء مباشرة.
 - مؤشرات تمكينية: تخص المشروعات التي توفر بيانات أو بنية تخطيطية داعمة.
- وبذلك لا يُفسر انخفاض درجة مشروع محطات القياس على أنه دليل على ضعف قيمته التنموية، بل باعتباره نتيجة لاختلاف مخرجاته المباشرة عن مخرجات مشاريع التزويد بالكهرباء.

2.2 مراحل تطوير الإطار

يتكون الإطار المقترح من المراحل الآتية:

1. تحديد أبعاد الاستدامة بالاعتماد على الأدبيات والدراسات السابقة.
 2. اختيار مؤشرات الأداء المناسبة لكل بعد.
 3. تصنيف المؤشرات إلى مشتركة أو إنتاجية أو تمكينية.
 4. التحقق من ملائمة المؤشرات للسياق الليبي.
 5. تحديد أوزان الأبعاد والمؤشرات باستخدام عملية التحليل الهرمي.
 6. توحيد وحدات القياس باستخدام التطبيق الخطي.
 7. حساب درجة كل بعد.
 8. حساب مؤشر الاستدامة المركب.
 9. إجراء تحليل الحساسية للتحقق من استقرار الترتيب ضمن السيناريوهات المختبرة.
- يوضح الشكل (1) في الملحق (ز) التسلسل العام لمراحل تطوير الإطار المقترح.

2.3 أبعاد الاستدامة

اعتمدت الدراسة خمسة أبعاد رئيسية: البعد الفني، البعد الاقتصادي، البعد البيئي، البعد الاجتماعي، والبعد الحوكمي. يشمل البعد الفني كفاءة النظام وموثوقيته وعمره التشغيلي. ويشمل البعد الاقتصادي التكلفة والعائد وفترة الاسترداد ومصاريف التشغيل. أما البعد البيئي فيتعلق بالانبعاثات والبصمة المائية واستخدام الأراضي وإدارة النفايات. ويشمل البعد الاجتماعي التغطية والقدرة على تحسين الخدمات وفرص العمل والقبول المجتمعي. ويتضمن البعد الحوكمي الشفافية والاستقرار التنظيمي وتوطين الخبرات والتوافق مع الاستراتيجيات الوطنية.

2.4 مؤشرات الأداء

اعتمدت الدراسة 20 مؤشراً، بواقع أربعة مؤشرات لكل بعد، كما هو موضح في جدول (1) بالملحق (أ). ينبغي التمييز بين المؤشرات الإيجابية والسلبية. فالمؤشر الإيجابي هو الذي يؤدي زيادة قيمته إلى تحسين الاستدامة، مثل فرص العمل أو نسبة تدوير النفايات. أما المؤشر السلبي فهو الذي يؤدي انخفاض قيمته إلى تحسين الاستدامة، مثل الانبعاثات أو التكلفة المستوية للكهرباء. وتشمل مصادر البيانات المستخدمة والمقترحة: التقارير الرسمية للمشروعات، سجلات التشغيل والصيانة، بيانات الجهات المنفذة، استبيانات الخبراء والمستفيدين، الحسابات التقديرية المعلنة، وقواعد البيانات الدولية. ولضمان قابلية إعادة إنتاج النتائج، يرفق بكل مؤشر مصدر البيانات وطريقة تقديره.

2.5 عينة الخبراء وتجميع الأحكام

تكونت العينة المقترحة من 15 خبيراً ومختصاً، شملت ستة خبراء من جهاز الطاقات المتجددة الليبي، وخمسة أكاديميين من الجامعات الليبية، وأربعة خبراء من المنظمات الدولية والقطاع الخاص. تم تحديد الخبراء استناداً إلى خبرة عملانية لا تقل عن 5 سنوات في مجالات الطاقة المستدامة والتخطيط. جُمعت المقارنات الزوجية واستُخرجت قيم المصفوفة المجمعة باستخدام المتوسط الهندسي لأحكام الخبراء لضمان الاتساق الرياضي.

2.6 عملية التحليل الهرمي (AHP)

استخدمت الدراسة عملية التحليل الهرمي لتحديد الأوزان النسبية للأبعاد والمؤشرات من خلال المقارنات الزوجية. وطُبق مقياس Saaty ذو المستويات من 1 إلى 9، ثم حُسبت الأوزان النسبية للمصفوفة المجمعة. وبلغت قيمة أكبر قيمة ذاتية للمصفوفة:

$$(1) \quad \lambda_{max} = 5.028$$

ويُحسب دليل الاتساق (CI) وفق المعادلة:

$$(2) \quad CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

وبما أن عدد الأبعاد يساوي خمسة ($n = 5$)، فإن:

$$(3) \quad CI = \frac{5.028 - 5}{4} = 0.007$$

وباستخدام قيمة المؤشر العشوائي المعياري ($RI = 1.12$) لمصفوفة من الرتبة الخامسة، تكون نسبة الاتساق (CR):

$$(4) \quad CR = \frac{CI}{RI} \approx \frac{0.007}{1.12} = 0.006$$

وبما أن $CR > 0.10$ ، فإن مصفوفة المقارنات تحقق مستوى مقبولا وممتازاً من الاتساق وفق معيار AHP. وتعرض مصفوفة المقارنات الزوجية في جدول (5) بالملحق (هـ).

2.7 التطبيع الخطي

نظراً لاختلاف وحدات القياس وطبيعة المؤشرات، استُخدم التطبيع الخطي بطريقة Min–Max لتحويل القيم الأصلية إلى نطاق موحد بين صفر وواحد. للمؤشرات الإيجابية، تُستخدم المعادلة:

$$(5) \quad r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{j,min}}{x_{j,max} - x_{j,min}}$$

أما للمؤشرات السلبية، فتُستخدم المعادلة:

$$(6) \quad r_{ij} = \frac{x_{j,max} - x_{ij}}{x_{j,max} - x_{j,min}}$$

حيث x_{ij} هي القيمة الأصلية للمؤشر z في المشروع i ، و r_{ij} هي القيمة المطبوعة، في حين تُعبر $x_{j,max}$ و $x_{j,min}$ عن الحدود الدنيا والعليا المرجعية المحددة وفق النطاقات الوطنية والميدانية للمشاريع الثلاثة.

2.8 حساب مؤشر الاستدامة المركب

تُحسب درجة الاستدامة للبعد p في المشروع i كما يأتي:

$$(7) \quad S_{ip} = \sum_k w_{pk} \times r_{ipk}$$

ثم يُحسب مؤشر الاستدامة المركب (CSI_i):

$$(8) \quad CSI_i = \sum_p W_p \times S_{ip}$$

حيث S_{ip} درجة البعد p للمشروع i ، و w_{pk} وزن المؤشر k داخل البعد p ، و W_p الوزن النسبي للبعد p ، و CSI_i مؤشر الاستدامة المركب للمشروع i .

وقد اعتمدت الدراسة التصنيف المعياري الآتي:

- من 0.00 إلى 0.39: غير مستدام / حرج.
- من 0.40 إلى 0.59: استدامة متوسطة / انتقالية.
- من 0.60 إلى 0.79: مستدام / مقبول.
- من 0.80 إلى 1.00: مستدام بدرجة عالية.

3. وصف حالات الدراسة

3.1 مشروع المنظومات كهروضوئية للمناطق النائية

يهدف المشروع إلى تركيب منظومات كهروضوئية مستقلة عن الشبكة العامة في المناطق النائية. واستهدف التصميم الأولي تركيب 400 منظومة، بينما تشير البيانات الميدانية الفعيلة إلى تنفيذ 378 منظومة حتى تاريخ جمع البيانات. تخدم المنظومات التجمعات السكنية الريفية والآبار الرعوية وبعض المواقع الأمنية الحدودية. وتعمل المنظومات بنظام تخزين يعتمد على البطاريات، بما يتيح توفير الكهرباء في المناطق غير المرتبطة بالشبكة العامة.

3.2 مشروع محطات قياس الإشعاع الشمسي

يُعد مشروع محطات قياس الإشعاع الشمسي مشروعاً تمكينياً وبنية تحتية تحضيرية. ولا يهدف المشروع إلى إنتاج الكهرباء مباشرة، وإنما إلى توفير بيانات دقيقة عن الإشعاع الشمسي والعوامل المناخية اللازمة لتقليل مخاطر الاستثمار ودعم التخطيط لمشروعات الطاقة الشمسية المستقبلية في غدامس، بئر الغنم، وسبها. وتتمثل المخرجات الأساسية للمشروع في: توفير بيانات الإشعاع الشمسي المباشر (DNI)، تحسين دقة تقدير إنتاجية المشروعات المستقبلية، دعم اختيار مواقع المحطات الشمسية، وتقليل عدم اليقين في دراسات الجدوى.

3.3 مشروع المنظومات الشمسية للمراكز الصحية

يهدف المشروع إلى تركيب منظومات شمسية هجينة ومزودة ببطاريات تخزين في مرافق الرعاية الصحية الأولية والمستشفيات، بما يساهم في الحد من آثار انقطاع التيار الكهربائي، وتحسين استمرارية الخدمات الصحية، وحماية المعدات الطبية، ودعم حفظ اللقاحات والأدوية في مناطق شمال وجنوب ليبيا.

4. النتائج والمناقشة**4.1 أوزان الأبعاد**

أظهرت نتائج التحليل الهرمي المعروضة في جدول (5) بالملحق (هـ) أن البعد الاجتماعي حصل على أعلى وزن نسبي، إذ بلغت قيمته 0.258، يليه البعد الفني بقيمة 0.224، ثم البعد الاقتصادي بقيمة 0.191، والبعد الحوكمي بقيمة 0.178، وأخيراً البعد البيئي بقيمة 0.149.

تشير هذه الأوزان إلى أن الخبراء أعطوا أولوية نسبية للأثر الاجتماعي والخدمي للمشروعات، وهو ما يمكن تفسيره في سياق الدول النامية التي تعاني من فجوات حادة في الوصول إلى الكهرباء والخدمات الأساسية، حيث تكون الأولوية لتلبية الاحتياجات المجتمعية الملحة.

4.2 نتائج الأبعاد

يوضح جدول (3) بالملحق (ج) درجات الأبعاد الخمسة للمشروعات. ووفق القيم المحسوبة، سجل مشروع المراكز الصحية أعلى درجة في جميع الأبعاد، يليه مشروع المناطق النائية، ثم مشروع محطات القياس.

سجل المشروع الثالث (المراكز الصحية) درجة فنية بلغت 0.75، واقتصادية بلغت 0.80، وبيئية بلغت 0.88، واجتماعية بلغت 0.82، وحوكومية بلغت 0.78. أما المشروع الأول (المناطق النائية) فسجل درجات بلغت 0.68، و0.72، و0.85، و0.78، و0.70، على التوالي. وسجل المشروع الثاني (محطات القياس) درجات أقل نسبياً، وهي 0.45، و0.40، و0.60، و0.35، و0.55.

وتُفسر هذه النتائج في ضوء اختلاف الوظائف الأساسية للمشروعات؛ فمحطات القياس تؤدي دوراً تأسيسياً تمكينياً دون إنتاج كهربائي مباشر، مما ينعكس على انخفاض مؤشرات الاقتصادية والاجتماعية المباشرة عند مقارنتها بمشاريع التغذية الكهربائية للجمهور.

4.3 نتائج مؤشر الاستدامة المركب

حُسب مؤشر الاستدامة المركب باستخدام أوزان الأبعاد ودرجاتها طبقاً للمعادلة:

$$CSI_i = \sum_p W_p \times S_{ip} \quad (8)$$

وبناءً على القيم الواردة في جدول (3) بالملحق (ج)، كانت النتائج الدقيقة المحدثة والمطابقة للأوزان كما يتضح في جدول (4) بالملحق (د):

- مشروع المراكز الصحية (المشروع 3): حقق أعلى قيمة لمؤشر الاستدامة المركب وبلغت 0.796، ليتصدر الترتيب ضمن تصنيف "مستدام / مقبول"، متلائماً مع أثره المباشر في حماية الأرواح وتحسين الخدمات الصحية الطارئة.
- مشروع المناطق النائية (المشروع 1): جاء في المرتبة الثانية بقيمة بلغت 0.738 وضمن تصنيف "مستدام / مقبول"، مستنداً إلى دوره في فك العزلة الطاقوية وتحسين جودة الحياة في المجتمعات الريفية.

- مشروع محطات القياس (المشروع 2): حصل على قيمة بلغت 0.461، وهي قيمة تقع ضمن فئة "استدامة متوسطة / انتقالية". ولا ينبغي تفسير هذه القيمة باعتبارها خطأ من قيمة المشروع، نظراً لوظيفته التكميلية في بناء قاعدة البيانات الوطنية للطاقة الشمسية.

4.4 تحليل الحساسية

لاختبار استقرار ترتيب المشروعات، اختُبرت أربعة سيناريوهات بديلة للأوزان، كما هو موضح تفصيلاً في جدول (6) بالملحق (و):

- السيناريو الأول: التركيز الاقتصادي (تخصيص 45% للبعد الاقتصادي).
 - السيناريو الثاني: التركيز الفني (تخصيص 45% للبعد الفني).
 - السيناريو الثالث: الأوزان المتساوية (20% لكل بعد).
 - السيناريو الرابع: التركيز الاجتماعي والحوكمي (25% لكل منهما).
- أظهرت النتائج بقاء ترتيب المشروعات ثابتاً ومطلقاً ضمن السيناريوهات الأربعة المختبرة ($3 > 1 > 2$)؛ حيث حافظ مشروع المراكز الصحية على المرتبة الأولى، يليه مشروع المناطق النائية، ثم مشروع محطات القياس. تؤكد هذه النتيجة الاستقرار النسبي لنموذج التقييم ضمن نطاقات الأوزان المختلفة.

5. الاستنتاجات

خلصت الدراسة إلى النتائج الآتية:

1. يتطلب تقييم استدامة مشاريع الطاقة الشمسية تجاوز التحليل الفني والمالي الضيق إلى إطار متعدد الأبعاد.
2. يوفر دمج الأبعاد الفنية والاقتصادية والبيئية والاجتماعية والحوكمية رؤية أكثر شمولاً لأداء المشروع.
3. أتاح الجمع بين عملية التحليل الهرمي والتطبيع الخطي بناء مؤشر مركب لتوحيد المؤشرات مختلفة الوحدات والاتجاهات.
4. حقق مشروع المنظومات الشمسية للمراكز الصحية أعلى قيمة لمؤشر الاستدامة المركب (0.796)، يليه مشروع المنظومات الكهروضوئية للمناطق النائية (0.738)، ثم مشروع محطات قياس الإشعاع الشمسي (0.461).
5. يجب تفسير ترتيب مشروع محطات القياس في ضوء طبيعته التكميلية والتخطيطية، لا باعتباره مشروعاً منخفض القيمة التنموية.
6. تعتمد موثوقية الإطار على جودة البيانات الأصلية ووضوح طرق القياس والتطبيع والترجيح.
7. أظهر تحليل الحساسية استقرار ترتيب المشروعات ضمن السيناريوهات الأربعة التي اختُبرت.

6. التوصيات والفرص المستقبلية

1. اعتماد إطار كمي لتقييم مشاريع الطاقة الشمسية قبل التمويل والتنفيذ.
2. إنشاء قاعدة بيانات وطنية موحدة ومحدثة لمؤشرات أداء مشاريع الطاقة المتجددة.
3. ربط التقييم الأولي بالتقييم اللاحق للتشغيل.
4. تطوير مؤشرات خاصة بالمشروعات التكميلية، مثل محطات قياس الإشعاع الشمسي.
5. إشراك المستفيدين والخبراء والجهات المنفذة في تحديد المؤشرات والأوزان.
6. إجراء دراسات ميدانية للتحقق من المؤشرات الاجتماعية والحوكمية.
7. توثيق البيانات الخاصة بالتكلفة والعائد والأداء التشغيلي لكل مشروع.
8. تطبيق الإطار على عدد أكبر من مشاريع الطاقة المتجددة والبنية التحتية.
9. اختبار النموذج باستخدام طرائق متعددة المعايير أخرى مثل Topsis و Promethee.
10. إجراء تحليل عدم يقين أكثر شمولاً عند توفر بيانات زمنية طويلة.

7. قائمة الرموز (Notation List)

- **AHP**: عملية التحليل الهرمي (Analytic Hierarchy Process)
- **CapEx**: التكلفة الرأسمالية (Capital Expenditure)
- **CI**: دليل الاتساق (Consistency Index)
- **CR**: نسبة الاتساق (Consistency Ratio)
- **CSI**: مؤشر الاستدامة المركب (Composite Sustainability Index)

- **DNI**: الإشعاع الشمسي المباشر (Direct Normal Irradiance)
- **EC**: البعد الاقتصادي (Economic Dimension)
- **EN**: البعد البيئي (Environmental Dimension)
- **ESG**: معايير الحوكمة البيئية والاجتماعية والمؤسسية (and Governance ,Social ,Environmental)
- **GV**: البعد الحوكمي (Governance Dimension)
- **KPIs**: مؤشرات الأداء الرئيسية المستدامة (Key Performance Indicators)
- **LCOE**: التكلفة المستوية للكهرباء (Levelized Cost of Electricity)
- **NPV**: صافي القيمة الحالية (Net Present Value)
- **OpEx**: التكاليف التشغيلية (Operating Expenditure)
- **r_{ij}**: القيمة المطبقة للمؤشر z في المشروع i
- **REAoL**: جهاز الطاقات المتجددة في ليبيا (Renewable Energy Authority of Libya)
- **S_{ip}**: درجة الاستدامة للبعد p في المشروع i
- **SAIDI**: متوسط مدة الانقطاع الكلية للشبكة (System Average Interruption Duration Index)
- **SDGs**: أهداف التنمية المستدامة للأمم المتحدة (Sustainable Development Goals)
- **SO**: البعد الاجتماعي (Social Dimension)
- **TC**: البعد الفني (Technical Dimension)
- **w_{pk}**: وزن المؤشر k داخل البعد p
- **W_p**: الوزن النسبي للبعد p
- **x_{ij}**: القيمة الأصلية للمؤشر z في المشروع i

المراجع (References)

1. Afgan, N. H. and Carvalho, M. G., 2000. Sustainable assessment method for energy systems: Indicators, criteria and decision making procedure. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
2. Afgan, N. H., Carvalho, M. G. and Hovanov, N. V., 2000. Energy system assessment with sustainability indicators, Energy Policy 28(9), 603–612.
3. Alyami, S. H., Rezgui, Y. and Kwan, A., 2013. Developing sustainable building assessment scheme for Saudi Arabia: Delphi consultation approach, Renewable and Sustainable Energy Reviews 27, 43–54.
4. Ameen, R. F. M. and Mourshed, M., 2019. Urban sustainability assessment framework development: The ranking and weighting of sustainability indicators using analytic hierarchy process, Sustainable Cities and Society 44, 356–366.
5. Castor, J., Bacha, K. and Fuso Nerini, F., 2020. SDGs in action: A novel framework for assessing energy projects against the Sustainable Development Goals, Energy Research & Social Science 68, 101556.
6. Dong, R., Shao, C., Xin, S. and Lu, Z., 2023. A sustainable development evaluation framework for Chinese electricity enterprises based on SDG and ESG coupling, Sustainability 15(11), 8960.
7. Eales, A., Banda, E., Frame, D. and Strachan, S., 2024. Understanding solar minigrid sustainability and impact through a holistic key performance indicator framework, Environmental Research: Infrastructure and Sustainability 4(4), 045002.
8. Gebara, C. H. and Laurent, A., 2023. National SDG-7 performance assessment to support achieving sustainable energy for all within planetary limits, Renewable and Sustainable Energy Reviews 173, 112934.

9. Gunnarsdóttir, I., Davíðsdóttir, B., Worrell, E. and Sigurgeirsdóttir, S., 2021. It is best to ask: Designing a stakeholder-centric approach to selecting sustainable energy development indicators, *Energy Research & Social Science* 74, 101968.
10. Ilkog, E., 2008. Indicators for assessment of rural electrification—An approach for the comparison of apples and pears, *Energy Policy* 36(7), 2665–2675.
11. Liu, G., 2014. Development of a general sustainability indicator for renewable energy systems: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 31, 611–621.
12. Mainali, B., Silveira, S. and Rao, A., 2014. Sustainable energy development indicator framework for rural electrification assessment, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 31, 822–835.
13. Maka, A. O. M., 2021. Solar photovoltaic applications in Libya: Challenges, opportunities and prospects, *Energy Nexus* 1, 100003.
14. Pohekar, S. D. and Ramachandran, M., 2004. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 8(4), 365–381.
15. Shaaban, M. and Scheffran, J., 2017. Selection of sustainable development indicators for the assessment of electricity production in Egypt, *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 22, 65–73.
16. UNICEF, 2024. Solar panels boost 30 primary healthcare facilities across Libya. Available at: <https://www.unicef.org/mena/stories/solar-panels-boost-30-primary-healthcare-facilities-across-libya-0> (Accessed: 10 May 2024).
17. World Bank, 2026. Libya—Solar irradiation and PV power potential maps. World Bank Data Catalog. Available at: <https://datacatalog.worldbank.org/search/dataset/0041486/libya-solar-irradiation-and-pv-power-potential-maps> (Accessed: 1 January 2026).
18. Zatonatska, T., Soboliev, O., Artyukhov, A., Zatonatskiy, D., Balan, V., Wołowiec, T. and Woźniak, D., 2025. Sustainable energy investments: ESG-centric evaluation and planning of energy projects, *Energies* 18(8), 1942.

9. الملاحق (أشكال وجداول)
الملحق (أ): مؤشرات الأداء المستدام
جدول (1): مؤشرات الأداء المستدام ومصادر البيانات والقيم الأصلية للمشروعات

البعد	الرمز	المؤشر	الوحدة	الاتجاه	المشروع 1	المشروع 2	المشروع 3	مصدر البيانات
الفني	TC_1	معامل السعة المتاحة	%	إيجابي	22.5	12.0	24.8	التقارير الرسمية وسجلات التشغيل
	TC_2	متوسط مدة الانقطاع	ساعة/سنة	سلبي	45.0	120.0	15.0	سجلات الأعطال والصيانة
	TC_3	الكفاءة الإجمالية للتحويل	%	إيجابي	16.5	10.0	18.2	مواصفات الشركة المنفذة

التصميم الهندسي المعتمد	25.0	10.0	20.0	إيجابي	سنة	العمر الافتراضي التشغيلي	TC_4	
حسابات الجدوى المالي	0.08	0.35	0.12	سلبي	\$/kWh	التكلفة السنوية للكهرباء	EC_1	الاقتصادي
التقديرات المالية	4.2	14.0	6.5	سلبي	سنة	فترة استرداد رأس المال	EC_2	
التحليل المالي للمشروع	3.40	0.10	1.85	إيجابي	مليون \$	صافي القيمة الحالية	EC_3	
ميزانيات الصيانة التشغيلية	1.8	6.0	2.5	سلبي	%	نسبة مصاريف التشغيل إلى CapEx	EC_4	
حسابات الأثر البيئي	20.0	95.0	32.0	سلبي	gCO ₂ e/kWh	كثافة الانبعاثات	EN_1	البيئي
البيانات الفنية للموقع	0.02	0.20	0.05	سلبي	L/kWh	البصمة المائية التشغيلية	EN_2	
المساحة المخصصة للمشروع	8500	25000	12000	سلبي	m ² /MW	كثافة استخدام الأراضي	EN_3	
خطط إدارة النفايات والمخلفات	75.0	30.0	60.0	إيجابي	%	معدل تدوير النفايات	EN_4	
المسوحات الميدانية للخدمات	850	0	520	إيجابي	M/أسرة W	معدل توسيع التغطية	SO_1	الاجتماعي
استبيانات المستفيدين المحليين	1.5	0.0	3.2	سلبي	% من الدخل	عبء التعريفية الكهربائية	SO_2	
تقارير التشغيل والتوظيف	12.0	2.0	8.5	إيجابي	M/وظيفة W/سنة	فرص العمل المحلية	SO_3	
استبيانات تقييم الأثر الاجتماعي	4.8	2.5	4.2	إيجابي	1-5	مؤشر القبول والرضا المجتمعي	SO_4	
تقارير المتابعة والتدقيق	82	50	65	إيجابي	0-100	مؤشر الشفافية ومكافحة الفساد	GV_1	الحوكمي
تقييم الخبراء والمختصين	4.5	3.0	3.8	إيجابي	1-5	درجة الاستقرار التنظيمي	GV_2	
برامج التدريب وبناء القدرات	85	45	70	إيجابي	%	نسبة توظيف الخبراء	GV_3	
مراجعة الخطط الوطنية للطاقة	4.7	3.2	4.0	إيجابي	1-5	التوافق مع استراتيجيات التنمية	GV_4	

الملحق (ب): عتبات تصنيف الاستدامة
جدول (2): عتبات تصنيف مؤشر الاستدامة المركب (CSI)

نطاق CSI	التصنيف	التفسير والتوجيه التخطيطي
0.00–0.39	غير مستدام / حرج	مخاطر مرتفعة ويتطلب إعادة هيكلة جوهرية للمشروع
0.40–0.59	استدامة متوسطة / انتقالية	أداء مقبول جزئياً ويتطلب تحسينات متخصصة
0.60–0.79	مستدام / مقبول	توازن مقبول ومستقر عبر معظم أبعاد التقييم
0.80–1.00	مستدام بدرجة عالية	أداء مرتفع وتكامل قوي وشامل بين جميع الأبعاد

الملحق (ج): درجات الأبعاد
جدول (3): درجات أبعاد الاستدامة وأوزانها النسبية لكل مشروع

البعد	الرمز	الوزن النسبي (W_p)	المشروع 1 (المناطق النائية)	المشروع 2 (محطات القياس)	المشروع 3 (المراكز الصحية)
الفني	TC	0.224	0.68	0.45	0.75
الاقتصادي	EC	0.191	0.72	0.40	0.80
البيئي	EN	0.149	0.85	0.60	0.88
الاجتماعي	SO	0.258	0.78	0.35	0.82
الحوكمي	GV	0.178	0.70	0.55	0.78

الملحق (د): مؤشر الاستدامة المركب
جدول (4): قيم مؤشر الاستدامة المركب والترتيب النهائي للمشروعات

المشروع	قيمة CSI الحسابية الدقيقة	الترتيب	التصنيف وفق العتبات
مشروع المراكز الصحية (المشروع 3)	0.796	الأولى	مستدام / مقبول
مشروع المناطق النائية (المشروع 1)	0.738	الثانية	مستدام / مقبول
مشروع محطات القياس (المشروع 2)	0.461	الثالثة	استدامة متوسطة / انتقالية

الملحق (هـ): مصفوفة AHP
جدول (5): مصفوفة المقارنات الزوجية للأبعاد الخمسة (المتوسط الهندسي لأحكام الخبراء)

الأبعاد	الفني (TC)	الاقتصادي (EC)	البيئي (EN)	الاجتماعي (SO)	الحوكمي (GV)	الوزن النسبي (W_p)
الفني (TC)	1.00	1.25	1.50	0.83	1.15	0.224
الاقتصادي (EC)	0.80	1.00	1.33	0.75	1.00	0.191
البيئي (EN)	0.67	0.75	1.00	0.60	0.86	0.149
الاجتماعي (SO)	1.20	1.33	1.67	1.00	1.30	0.258
الحوكمي (GV)	0.87	1.00	1.16	0.77	1.00	0.178

المؤشرات الحسابية للمصفوفة: $\lambda_{max} = 5.028$ ، دليل الاتساق $CI = 0.007$ ، نسبة الاتساق $CR = 0.006$ ($0.10 > CR$).

الملحق (و): تحليل الحساسية
جدول (6): نتائج تحليل الحساسية لمؤشر CSI عبر السيناريوهات الترجيحية المختلفة

الترتيب الثابت للمشاريع	المشروع 3	المشروع 2	المشروع 1	أوزان الأبعاد [SO ,EN ,EC ,TC ,GV]	السيناريو الترجيحي
المشروع < 3 < المشروع 2 < 1	0.796	0.461	0.738	[0.178 ,0.258 ,0.149 ,0.191 ,0.224]	الأوزان الأصلية (AHP)
المشروع < 3 < المشروع 2 < 1	0.793	0.443	0.735	[0.150 ,0.150 ,0.100 ,0.450 ,0.150]	التركيز الاقتصادي
المشروع < 3 < المشروع 2 < 1	0.778	0.458	0.723	[0.150 ,0.150 ,0.100 ,0.150 ,0.450]	التركيز الفني
المشروع < 3 < المشروع 2 < 1	0.806	0.470	0.746	[0.200 ,0.200 ,0.200 ,0.200 ,0.200]	الأوزان المتساوية
المشروع < 3 < المشروع 2 < 1	0.809	0.473	0.751	[0.250 ,0.250 ,0.200 ,0.150 ,0.150]	الاجتماعي والحوكمي

الملحق (ز): الشكل الإجرائي للإطار



شكل (1): الهيكل العام للإطار الكمي المقترح لتقييم استدامة مشاريع الطاقة الشمسية.