International Science and Technology Journal
المجلة الدولية للعلوم والتقنية
Volume 37 العدد
Part 1 المجلد
المجلة الدولية للعلوم والتقنية
International Science and Technology Journal
ISTJ

http://www.doi.org/10.62341/rfbb8012

Received	2025/07/12	تم استلام الورقة العلمية في
Accepted	2025/08/10	تم قبول الورقة العلمية في
Published	2025/08/12	تم نشر الورقة العلمية في

الجدوى الاقتصادية والآثار الاستراتيجية لتحويل إطارات النفايات إلى وقود غازي في ليبيا

دراسة حالة في مدينة الزاوية

رضاء فحيل البوم *[1]، بشير بريكة [2]

[1] كلية هندسة النفط والغاز والطاقات المتجددة، جامعة الزاوية، ليبيا

[2] المنظمة الليبية للبيئة والمناخ، طرابلس، ليبيا

Email : r.fhelboom@zu.edu.ly

الملخص

تُعد مشكلة التراكم المتزايد للإطارات المستعملة في ليبيا، لا سيما في المراكز الحضرية الناشئة مثل مدينة الزاوية بليبيا، مشكلة كبيرة بسبب تأثيرها البيئي والصحي وتتطلب حلولاً ليست مجدية من الناحية الفنية فحسب، بل يجب أن تكون جذابة اقتصاديًا وسليمة من الناحية الاستراتيجية. إضافة إلى تقييم الجدوى الفنية لإنتاج الغاز التخليقي من الإطارات المستعملة عبر التغويز، تركز هذه الدراسة على إجراء تقييم دقيق للجدوى الاقتصادية والآثار الاستراتيجية الأوسع لتنفيذ مثل هذا المرفق في الزاوية، والذي تم تصميمه في دراسة سابقة لمعالجة نحو 4600 طن من الإطارات سنويًا (بمعدل 12.6 طن يوميًا) بتكاليف رأسمالية قدرها 14.190 مليون دولار أمريكي وإجمالي تكلفة تشغيل سنوية تبلغ 2.920 مليون دولار، وبأرباح سنوية متوقعة تصل إلى 2.258 مليون دولار أمريكي عند معدل خصم افتراضي قدره 5% ولعمر افتراضي يبلغ 15 عامًا .يُظهر التحليل المالي الشامل، الذي يستخدم مقاييس رئيسية مثل صافي القيمة الحالية (NPV) والذي بلغ 19.676 مليون دولار أمريكي، ومعدل العائد الداخلي (IRR) البالغ 15.9%، وفترة الاسترداد (PBP) المقدرة بـ 74 شهرًا، جاذبية مالية قوية للمشروع، مدفوعة في المقام الأول بتدفقات الإيرادات المتوقعة من مبيعات الغاز التخليقي عالي الجودة لتوليد الطاقة أو التطبيقات الصناعية. كما تسلط الدراسة الضوء على الفوائد البيئية الكبيرة، بما في ذلك التخفيضات الكبيرة في عبء مكبات النفايات وتخفيف الانبعاثات السامة الناتجة عن الحرق غير المنضبط، مما يساهم في الاقتصاد الدائري. ومن الناحية الاستراتيجية،

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/rfbb8012

تتماشى هذه المبادرة بقوة مع أهداف التنمية المستدامة الوطنية في ليبيا، مما يعزز أمن الطاقة، ويخلق فرص عمل محلية حيوية، ويشجع نقل التكنولوجيا القيمة في قطاعات تحويل النفايات إلى طاقة. وتخلص الدراسة إلى أن تغويز الإطارات المستعملة في الزاوية يمثل حلاً سليمًا من الناحية المالية، ومسؤولًا بيئيًا، وذو تأثير استراتيجي على تحديات إدارة النفايات الملحة في ليبيا، مما يوفر طريقًا نحو بيئة أنظف ومستقبل طاقة أكثر تنوعًا.

الكلمات المفتاحية: إطارات النفايات، التغويز، الجدوى الاقتصادية، أمن الطاقة.

Economic Feasibility and Strategic Implications of Waste Tyre Valorization via Gasification in Libya: A Case Study in Zawia

Reda Fhelboom*[1], Bashir Brika[2]
[1] Faculty of Oil ,Gas and Renewable Energy Engineering, University of Zawia, Zawia, Libya
[2] Libyan Organization for Environment and Climate, Tripoli, Libya
Email : r.fhelboom@zu.edu.ly

Abstract

Addressing the escalating accumulation of waste tyres in Libya, particularly within burgeoning urban centers like Zawia city, demands not only technically viable but also economically attractive and strategically sound solutions. In addition to assessing the technical feasibility of producing syngas from waste tyres via gasification, this study focuses on conducting a rigorous evaluation of the economic viability and broader strategic implications of implementing such a facility in Zawia, which was designed in a previous study to process approximately 4,600 tonnes of tyres annually (at a rate of 12.6 tonnes per day) with capital costs of USD 14.190 million, total annual operating costs of USD 2.920 million, and projected annual profits of USD 2.258 million, assuming a discount rate of 5% and a project lifetime of 15 years. A comprehensive financial analysis, employing key metrics such as Net Present Value (NPV) of USD 19.676 million, Internal Rate of Return (IRR) of 15.9%, and Payback Period (PBP) of 74 months, demonstrates the project's robust financial attractiveness, primarily driven by projected revenue streams from high-quality syngas sales for energy generation or industrial applications. The study also highlights significant environmental benefits, including substantial reductions in landfill burden and the mitigation of toxic emissions

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/rfbb8012

from uncontrolled burning, thereby contributing to a circular economy. From a strategic standpoint, this initiative strongly aligns with Libya's national sustainable development objectives, fostering enhanced energy security, creating vital local employment opportunities, and promoting valuable technology transfer in waste-to-energy sectors. The study concludes that waste tyre gasification in Zawia represents a financially sound, ecologically responsible, and strategically impactful solution for Libya's pressing waste management challenges, offering a pathway towards a cleaner environment and a more diversified energy future.
Keywords: Waste tyres; Gasification; Economic feasibility; Energy security.

1. المقدمة

إن النمو المتسارع في قطاع السيارات على مستوى العالم قد أدى، بشكل متوازٍ، إلى تفاقم تحدي إدارة إطارات النفايات المستهلكة (ELT)، مما نتج عنه تراكمات هائلة تُشكل مخاطر بيئية وصحية عامة كبيرة في جميع أنحاء العالم [1]. وفي مناطق مثل ليبيا، يُضاعف غياب البنية التحتية المتينة لإدارة النفايات من حجم هذه المشكلة، حيث تشهد مدن مثل الزاوية أزمات نفايات حادة تُعد فيها إطارات النفايات قضية بارزة ومستمرة [2، 43]. فأساليب التخلص التقليدية، بما في ذلك الرمي العشوائي، تُسهم في تدهور الأراضي، وتُصبح مرتعًا لناقلات الأمراض، وتُقدم مخاطر عالية للاشتعال غير المنضبط الذي يُطلق ملوثات ضارة في الغلاف الجوي والمياه الجوفية [5]. وحتى المقاربات الأكثر تنظيماً، مثل الحرق، غالباً ما تُكبد تكاليف اقتصادية كبيرة وتواجه تدقيقاً بيئياً بسبب الانبعاثات المصاحبة [6]. هذه الممارسات التقليدية تؤكد الحاجة المُلحة لبدائل مستدامة ومجدية اقتصادياً قادرة على تحويل النفايات إلى قيمة.

تُقدم تقنية تحويل النفايات إلى غاز (Gasification) حلاً مقنعًا لمشكلة إطارات النفايات. فباعتبارها عملية تحويل كيميائي حراري، تُحول المواد الكربونية، مثل إطارات النفايات، إلى غاز تخليقي يتكون أساساً من الهيدروجين (H_2) وأول أكسيد الكربون (CO) في ظروف نقص الأكسجين [7، 8]. على عكس الحرق الذي يهدف إلى الاحتراق الكامل، يُعظم التغويز استعادة الطاقة بينما يُوفر تحكماً أكبر في الانبعاثات ويُنتج منتجاً غازياً متعدد الاستخدامات يمكن الاستفادة منه لتوليد الطاقة، أو في التوليف الكيميائي، أو لإنتاج أنواع وقود بديلة [9]. لقد تم إثبات الجدوى الفنية وكفاءة أداء تحويل إطارات

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/rfbb8012

النفايات إلى وقود غازي، والمُحاكى خصيصاً لمدينة الزاوية بليبيا، في دراسة سابقة [2]. ومع ذلك، فإن الجدوى الفنية لمشروع ما لا تضمن وحدها تنفيذه أو نجاحه على المدى الطويل.

لذلك، تهدف هذه الورقة إلى سد هذه الفجوة من خلال إجراء تقييم شامل للجدوى الاقتصادية والآثار الاستراتيجية لإنشاء مصنع لتحويل إطارات النفايات إلى وقود غازي في الزاوية، ليبيا. ستقوم الدراسة بتحليل الجاذبية المالية للمشروع من خلال المؤشرات الاقتصادية الرئيسية، والتحقيق في تدفقات الإيرادات المحتملة المشتقة من الغاز المنتج، وتقدير الفوائد البيئية والاقتصادية الملموسة. علاوة على ذلك، ستستكشف كيف تنسجم هذه المبادرة مع الأهداف الاستراتيجية الأوسع لليبيا فيما يتعلق بالتنمية المستدامة، وأمن الطاقة، وخلق فرص العمل. من خلال تقديم تقييم شامل للأبعاد المالية والاستراتيجية للمشروع، تسعى هذه الدراسة إلى توفير إطار عمل قوي لصناع القرار والمستثمرين وأصحاب المصلحة للنظر في تحويل إطارات النفايات إلى وقود غازي كحجر زاوية لإدارة النفايات المستدامة وتنويع الطاقة في ليبيا.

2. منهجية التحليل الاقتصادي

لتقييم الجدوى الاقتصادية الشاملة لإنشاء مصنع لتحويل إطارات النفايات إلى وقود غازي في الزاوية، ليبيا، تم تطوير نموذج مالي دقيق. قام هذا النموذج بدمج المؤشرات الاقتصادية الرئيسية لتوقع ربحية المشروع وجاذبيته الاستثمارية على مدى عمر تشغيلي محدد. تشمل المقاييس الأساسية المستخدمة في هذا التحليل صافي القيمة الحالية **(NPV)**، **ومعدل العائد الداخلي (IRR)**، **وفترة استرداد رأس المال (PBP)**. تُعتبر هذه المؤشرات معترفًا بها على نطاق واسع في تقييم الاستثمارات للمشاريع طويلة الأجل، وتُوفر إطار عمل قويًا لاتخاذ القرار [2]. تم إجراء التحليل على مدار عمر افتراضي للمشروع يبلغ **15 عامًا**، وهي مدة قياسية للمشاريع الصناعية من هذا النوع، مع الأخذ في الاعتبار معدل خصم افتراضي بنسبة 5% ليعكس البيئة الاقتصادية الليبية والتكلفة النموذجية لرأس المال للاستثمارات الصناعية في المنطقة.

1.2. افتراضات التكلفة

وفقا لمجموعة دراسة المطاط الدولية (IRSG) ، فإن الافتراض القياسي هو أن نفايات الإطارات يتم توليدها بمعدل 1.05 إطار للشخص الواحد سنويا [10]. لذلك ، يبلغ عدد

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/rfbb8012

إطارات النفايات التي يتم إنتاجها كل عام في مدينة الزاوية حوالي 375,512 إطارا حيث بلغ عدد سكان المدينة ما يقارب من 357,631 نسمة حسب بيانات مصلحة الإحصاء والتعداد لعام 2021 أي ما يعادل 5050 طن سنوي (13.6 طن يوميا). [11].

تم تصميم مصنع ليعالج 12.6 طن من الإطارات المستهلكة يوميًا في مدينة االزاوية ولينتج الوقود الغازي بنسب مئوية 55.20% هيدروجين، 18.95% أول أكسيد الكربون، 19.62% ثاني أكسيد الكربون، 6.09٪ ميثان، ويحقق نسبة 2.9 هيدروجين إلى أول أكسيد الكربون ومعدل إنتاج 1071 متر مكعب من الوقود الغازي في الساعة (9.382 مليون م^3 / سنة) [2]

تضمن النموذج المالي كلاً من النفقات الرأسمالية (CAPEX) والنفقات التشغيلية (OPEX). وقد تم تقدير الإنفاق الرأسمالي الأولي للمشروع بـ 14.190 مليون دولار أمريكي، في حين قُدرت النفقات التشغيلية السنوية بحوالي 2.921 مليون دولار أمريكي. شملت النفقات الرأسمالية التكاليف المرتبطة ببناء مصنع تحويل النفايات إلى وقود غازي، واقتناء الآلات والمعدات الأساسية (مثل وحدة التغويز، وحدات تنقية الغاز التخليقي، مكونات توليد الطاقة)، وشراء الأراضي، وتطوير البنية التحتية الأولية. أما النفقات التشغيلية فقد شملت التكاليف المتكررة مثل شراء المواد الخام (إطارات النفايات)، والمرافق (الكهرباء، المياه)، وأجور العمالة، والصيانة، والمصاريف الإدارية، وتكاليف التخلص من المنتجات الثانوية (مثل الفحم النباتي، الرماد). استُمدت تقديرات التكاليف المحددة من مزيج من أسعار السوق الحالية، والمعايير الصناعية لمشاريع تحويل النفايات إلى طاقة مماثلة [2، 6، 12].

2.2. مصادر الإيرادات

يعتمد سعر الوقود الغازي بشكل أساسي على محتواه من الهيدروجين، تم احتساب متوسط سعر بيع الوقود الغازي العالي المحتوى من الهيدروجين ب 0.552 دولارا للمتر المكعب [13]، وبذلك سيكون الدخل السنوي = 0.552 دولار / م^3 * 9.382 م^3 / سنة

الدخل السنوي = 5.179 مليون دولار / سنة.

أما إجمالي الربح السنوي = الدخل السنوي – إجمالي تكاليف التشغيل السنوية

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/rfbb8012

الربح السنوي = 2.258 مليون دولار أمريكي في السنة. [2، 6، 13].

تُتيح مرونة الوقود الغازي تثمينه في تطبيقات متنوعة، بما في ذلك الاحتراق المباشر لتوليد الكهرباء أو كمادة خام قيمة لتوليف مواد كيميائية ذات قيمة أعلى [4، 7، 9]. ركز التحليل الاقتصادي في هذه الدراسة بشكل أساسي على الإيرادات الناتجة عن بيع الوقود الغازي لإنتاج الكهرباء، نظراً للطلب الليبي المستمر على الطاقة. تم تسعير الوقود الغازي بناءً على تعرفة الكهرباء المحلية والقيمة السوقية للغاز الطبيعي الذي يمكن أن يحل محله. كما توجد مصادر إيرادات محتملة إضافية، لم يتم تقديرها كمياً بشكل موسع في النموذج الأساسي، وتشمل بيع الفولاذ المستخلص من الإطارات وأي منتجات ثانوية قابلة للتسويق مثل الكربون الأسود أو الفحم النباتي، والتي يمكن أن تعزز ربحية المشروع بشكل أكبر [15,14,2].

3.2. المؤشرات المالية

- **صافي القيمة الحالية (NPV):** تُحسب صافي القيمة الحالية الفرق بين القيمة الحالية للتدفقات النقدية الداخلة والقيمة الحالية للتدفقات النقدية الخارجة على مدى فترة زمنية. تشير القيمة الحالية الصافية الإيجابية إلى أن المشروع من المتوقع أن يُولد نقداً أكثر مما يُكلف، مما يجعله استثمارًا مربحًا محتملاً [2].

- **معدل العائد الداخلي (IRR):** هو معدل الخصم الذي يجعل صافي القيمة الحالية لجميع التدفقات النقدية من مشروع معين مساوياً للصفر. يمثل هذا المعدل العائد السنوي المتوقع أن يحققه الاستثمار. يُعتبر المشروع مقبولاً بشكل عام إذا كان معدل العائد الداخلي الخاص به أكبر من تكلفة رأس المال [2].
- **فترة استرداد رأس المال (PBP):** تُقيس فترة استرداد رأس المال الوقت الذي يستغرقه الاستثمار لتوليد تدفق نقدي كافٍ لاسترداد تكلفته الأولية. يُفضل عموماً فترة استرداد أقصر، مما يشير إلى عودة أسرع على الاستثمار [2].

3. النتائج والمناقشة

قدمت النمذجة الاقتصادية الشاملة لمصنع تحويل إطارات النفايات إلى وقود غازي المقترح في الزاوية، ليبيا، مؤشرات مالية مقنعة، مما يُظهر جدوى استثمارية قوية للمشروع. على

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/rfbb8012

مدى العمر التشغيلي المُتوقع الذي يبلغ 15 عاماً، وبمعدل خصم افتراضي قدره 5%، يُظهر المشروع ربحية قوية وعوائد جذابة.

1.3. تحليل الأداء المالي

- **صافي القيمة الحالية (NPV):** يوضح الجدول رقم (1) طريقة حساب صافي القيمة الحالية للمشروع والتي بلغت 19.680 مليون دولار، وتشير القيمة الحالية الصافية الإيجابية والمُرتفعة إلى أن المشروع من المتوقع أن يُولد ثروة كبيرة لمستثمريه، حيث تتجاوز تدفقاته النقدية المستقبلية، بعد خصمها إلى قيمتها الحالية، الاستثمار الأولي وجميع التكاليف اللاحقة بشكل مريح [2]. تؤكد هذه القيمة الإيجابية ل NPV الجدوى المالية والجاذبية الاستثمارية للمشروع ضمن السياق الاقتصادي الليبي. من المفترض أن يبلغ عمر المصنع 15 عاما، أي بإجمالي أرباح 33.870 مليون دولار وبذلك يكون صافي الربح خلال 15 عاما 19.680 مليون دولار. [2]

- **معدل العائد الداخلي (IRR):** علاوة على ذلك، تم تحديد معدل العائد الداخلي للمشروع بنسبة **15.9%** يتجاوز هذا الرقم بشكل كبير تكلفة رأس المال المُفترضة (معدل الخصم) البالغة 5%، مما يدل على أن معدل العائد المتوقع للمشروع أعلى بكثير من الحد الأدنى المقبول للمستثمرين [2]. يُشير معدل العائد الداخلي البالغ إلى عائد تنافسي للغاية مقارنة بالاستثمارات المحتملة الأخرى، مما يضع مصنع تحويل إطارات النفايات إلى وقود غازي كفرصة واعدة لرأس المال المحلي والدولي.

$$\textbf{(IRR)} = \frac{\textbf{Gross Profit}}{\mathbf{C_{FC}}} \textbf{ x 100 = 15.9\%}$$

- **فترة استرداد رأس المال:(PBP)** من خلال الشكل رقم (1) يتضح أن فترة استرداد رأس المال هي 74 شهرا أي (6.16 عاما). تُشير فترة الاسترداد القصيرة نسبيًا هذه، خاصة بالنظر إلى العمر الافتراضي للمشروع البالغ 15 عامًا، إلى إمكانية استعادة الاستثمار الأولي بسرعة. يُقلل العائد السريع على الاستثمار من المخاطر المالية ويُعزز السيولة، مما يجعل المشروع جذابًا بشكل

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/rfbb8012

خاص للمستثمرين الذين يسعون إلى تخفيف المخاطر وتحقيق عوائد في إطار زمني معقول [6].

2.3. تحليل التدفقات المالية

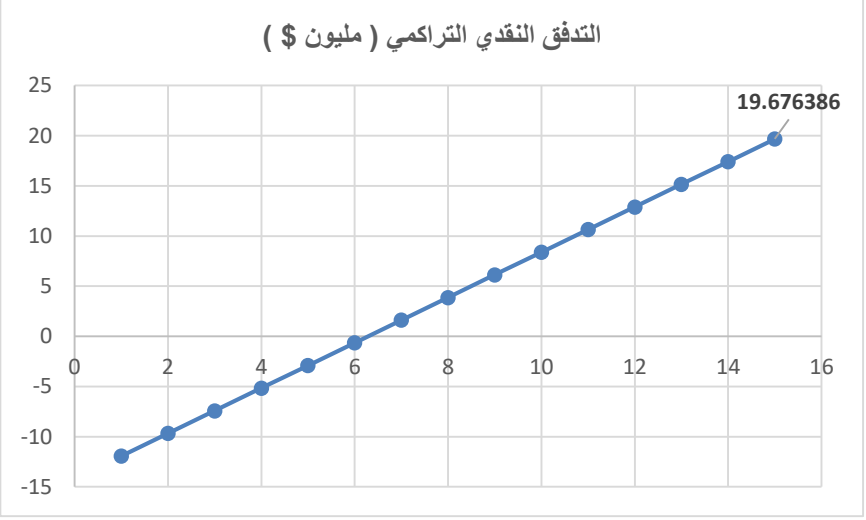
يوضح الجدول **(1)** التدفق النقدي للمشروع خلال عمره الافتراضي، بينما يُظهر **الشكل (1)** التدفق النقدي التراكمي للمصنع خلال نفس الفترة. تُؤكد هذه المؤشرات المالية مجتمعة على السلامة الاقتصادية لمشروع تحويل إطارات النفايات في الزاوية. تُشير القيمة الحالية الصافية القوية، ومعدل العائد الداخلي المرتفع، وفترة استرداد رأس المال السريعة إلى أن هذه المبادرة، من منظور مالي بحت، تمثل فرصة استثمارية مجدية ومربحة للغاية، وقادرة على توليد قيمة اقتصادية كبيرة مع معالجة تحدي بيئي حاسم.

الجدول رقم (1) : التدفق النقدي للمشروع خلال العمر الافتراضي (15 عامًا)

السنة	C_{FC}	تكاليف الإنتاج مليون $	الاهلاك مليون $ 5% C_{FC}	الدخل مليون $	إجمالي الربح مليون $	التدفق النقدي التراكمي مليون $
1	14.190	2.212	0.710	5.179	2.258	11.932-
2		2.212	0.710	5.179	2.258	9.674-
3		2.212	0.710	5.179	2.258	7.417-
4		2.212	0.710	5.179	2.258	5.159-
5		2.212	0.710	5.179	2.258	2.901-
6		2.212	0.710	5.179	2.258	0.643-
7		2.212	0.710	5.179	2.258	1.614
8		2.212	0.710	5.179	2.258	3.872
9		2.212	0.710	5.179	2.258	6.130
10		2.212	0.710	5.179	2.258	8,388
11		2.212	0.710	5.179	2.258	10,645
12		2.212	0.710	5.179	2.258	12.903
13		2.212	0.710	5.179	2.258	15.161
14		2.212	0.710	5.179	2.258	17.419
15		2.212	0.710	5.179	2.258	19.676

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/rfbb8012



شكل (1) التدفق النقدي التراكمي للمصنع خلال العمر الافتراضي

3.3. تحليل الحساسية

في حين يُظهر التحليل المالي الأولي (القسم 3.1) جدوى اقتصادية قوية للمشروع، فمن الضروري إجراء تحليل للحساسية لتقييم متانة هذه الاستنتاجات في مواجهة التقلبات المحتملة في المتغيرات الرئيسية للمشروع. يُحدد هذا التحليل العوامل التي لها التأثير الأكبر على مؤشرات الأداء المالي للمشروع (صافي القيمة الحالية ومعدل العائد الداخلي)، وبالتالي يُسلط الضوء على مجالات المخاطر أو الفرص الأعلى. تم إجراء تحليل الحساسية عن طريق تغيير المتغيرات الرئيسية بنسبة ±10% عن قيمها الأساسية، ومراقبة التغيرات المقابلة في صافي القيمة الحالية ومعدل العائد الداخلي.

تُشير النتائج إلى أن الجدوى المالية للمشروع هي الأكثر حساسية للتغيرات في سعر بيع الوقود الغازي. يُؤدي انخفاض بنسبة 10% في سعر الوقود الغازي إلى انخفاض كبير في كل من صافي القيمة الحالية ومعدل العائد الداخلي، مما يؤكد الأهمية الحاسمة لاستقرار ظروف السوق واتفاقيات التسعير الاستراتيجية للطاقة المُنتجة. وعلى العكس من ذلك، يُعزز ارتفاع بنسبة 10% في سعر الوقود الغازي ربحية المشروع بشكل كبير.

تُعتبر النفقات التشغيلية (OPEX)، وخاصة تكلفة المواد الخام (إطارات النفايات) وتكاليف خدمات المرافق مثل الكهرباء والمياه، عاملاً حاسماً آخر. يُؤثر ارتفاع النفقات التشغيلية بشكل مباشر على التدفقات النقدية الصافية للمشروع، مما يؤدي إلى انخفاض ملحوظ في

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/rfbb8012

صافي القيمة الحالية ومعدل العائد الداخلي. وبينما تُعتبر إطارات النفايات عمومًا مادة خام منخفضة التكلفة أو حتى ذات تكلفة سلبية (بسبب رسوم التخلص)، فإن الزيادات الكبيرة في تكاليف الجمع والنقل قد تؤثر على الربحية. [6].

كما يُظهر الأداء المالي للمشروع حساسية، وإن كانت بدرجة أقل، للتغيرات في النفقات الرأسمالية (CAPEX) ومعدل الخصم. بينما تُقلل الزيادة في النفقات الرأسمالية الأولية بشكل طبيعي من صافي القيمة الحالية ومعدل العائد الداخلي، فإن الربحية الأساسية القوية للمشروع تسمح له باستيعاب زيادات معتدلة. وبالمثل، تُؤثر التغيرات في معدل الخصم، التي تعكس التغيرات في تكلفة رأس المال، على القيمة الحالية للتدفقات النقدية المستقبلية، ولكن معدل العائد الداخلي المرتفع للمشروع يوفر حاجزًا مريحًا ضد تقلبات السوق النموذجية [2].

باختصار، يُظهر تحليل الحساسية أن مشروع تحويل إطارات النفايات إلى وقود غازي في الزاوية هو الأكثر تأثراً بالتغيرات في الإيرادات الناتجة عن مبيعات الوقود الغازي والتكاليف التشغيلية الإجمالية. سيكون التخطيط الاستراتيجي حول الوصول إلى أسواق الوقود الغازي والإدارة الفعالة للنفقات التشغيلية أمرًا بالغ الأهمية للحفاظ على الجاذبية المالية العالية للمشروع وتخفيف المخاطر المحتملة على مدار عمره التشغيلي.

4.3 الآثار الاستراتيجية

يتجاوز مشروع مصنع تحويل إطارات النفايات إلى وقود غازي في الزاوية، ليبيا، الجدوى المالية المُلزمة ليحمل في طياته آثاراً استراتيجية بالغة الأهمية للبلاد. يُمثل هذا المشروع مبادرة محورية للتنمية المستدامة واستغلال الموارد، حيث يقدم فوائد متعددة الأوجه تمتد عبر المجالات البيئية والاجتماعية–الاقتصادية وأهداف التنمية الوطنية.

1.4.3. الفوائد البيئية

تتمثل الفائدة البيئية الاستراتيجية الأكثر وضوحاً وعمقاً في التخفيف الكبير من تراكم إطارات النفايات، حيث تعاني ليبيا حالياً من مخزونات هائلة من إطارات النفايات المستهلكة [1، 3]، والتي تستهلك مساحات ثمينة من الأراضي، وتُشكل خطراً دائماً للحرائق، وتُعتبر بيئة خصبة لتكاثر الآفات والأمراض [5].

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/rfbb8012

من خلال تحويل هذه النفايات إلى وقود غازي قيّم، يُعالج المشروع بشكل مباشر تحدياً بيئياً حرجاً، حيث يُقلل بشكل كبير من حجم النفايات التي تتطلب التخلص منها ويُخفف من الآثار السلبية للدفن التقليدي. علاوة على ذلك، تُقدم عملية التغويز، عند إدارتها بشكل سليم ومع تقنيات تنقية الوقود الغازي [16]، بديلاً أكثر ملاءمة للبيئة بكثير من الحرق غير المنضبط أو الترميد، الذي يُطلق ملوثات عالية السمية مثل الديوكسينات والفورانات والمعادن الثقيلة في الغلاف الجوي [5، 6].

كما أن إنتاج وقود غازي نظيف، مناسب لتوليد الطاقة، يُقلل بشكل غير مباشر من الاعتماد على الوقود الأحفوري، مما يُسهم في خفض انبعاثات الغازات الدفيئة ويدعم الجهود الوطنية نحو التخفيف من آثار تغير المناخ ونموذج الاقتصاد الدائري.

2.4.3.التوافق مع أهداف التنمية الوطنية

من الناحية الاستراتيجية، ينسجم مشروع تحويل إطارات النفايات إلى وقود غازي بسلاسة مع أهداف التنمية المستدامة طويلة الأجل في ليبيا. فهو يدعم كفاءة استخدام الموارد من خلال تحويل نفايات مشكلة إلى مورد قيّم، مُجسداً بذلك مبادئ الاقتصاد الدائري. كما تُدعم المبادرة التوجه الوطني نحو التقدم التكنولوجي ونقل الخبرات من خلال إدخال تقنيات متطورة لتحويل النفايات إلى طاقة وتوفير الخبرة اللازمة [12].

وبعيداً عن الإشراف البيئي، يُسهم المشروع في التنويع الاقتصادي من خلال إنشاء قطاع صناعي جديد لتثمين النفايات، وهو أمر بالغ الأهمية لتقليل الاعتماد المفرط على عائدات النفط والغاز. من خلال معالجة النفايات، وتعزيز النمو الاقتصادي، وتشجيع حلول الطاقة النظيفة، يُمثل هذا المشروع خطوة ملموسة نحو بناء مستقبل أكثر مرونة، ومسؤولية بيئية، وازدهاراً لليبيا.

4 . الاستنتاجات

تُقدم هذه الدراسة تقييماً معمقاً للجدوى الاقتصادية والآثار الاستراتيجية المترتبة على إنشاء مصنع لتحويل إطارات النفايات إلى وقود غازي في مدينة الزاوية الليبية. لقد أظهر التحليل المالي الشامل، الذي استخدم مؤشرات رئيسية مثل صافي القيمة الحالية (NPV)، ومعدل العائد الداخلي (IRR)، وفترة استرداد رأس المال (PBP)، جاذبية استثمارية عالية للمشروع، مما يؤكد قدرته على توليد عوائد مالية مجزية. كما بيّن تحليل الحساسية أن

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/rfbb8012

المشروع يتمتع بمتانة جيدة، مع حساسية رئيسية لتقلبات سعر بيع الوقود الغازي وتكاليف التشغيل.

إلى جانب هذه الجدوى المالية القوية، يحمل المشروع آثاراً استراتيجية متعددة الأوجه لليبيا. فمن الناحية البيئية، يُقدم حلاً مستداماً وضرورياً لمشكلة تراكم إطارات النفايات، مما يُقلل من التلوث ويُخفف من المخاطر البيئية والصحية المرتبطة بالحرق العشوائي أو الدفن غير السليم. ومن الناحية الاجتماعية والاقتصادية، يُبشر المشروع بتوفير فرص عمل حيوية، ودعم الصناعات المحلية، وتعزيز أمن الطاقة من خلال تنويع مزيج الطاقة وتقليل الاعتماد على عائدات النفط والغاز التقليدية. استراتيجياً، ينسجم المشروع تماماً مع الأهداف الوطنية الليبية للتنمية المستدامة، ويدعم نقل التكنولوجيا، ويُعزز من النمو الاقتصادي المتنوع.

أخيراً، يُمثل مشروع تحويل إطارات النفايات إلى وقود غازي في الزاوية، ليبيا، ليس فقط فرصة استثمارية واعدة من الناحية الاقتصادية، بل هو أيضاً استجابة مسؤولة للتحديات البيئية، ومحفز للنمو الاجتماعي والاقتصادي. إن هذا المشروع يُسهم بشكل فعال في تحقيق مستقبل أكثر استدامة، وأمناً طاقوياً، وازدهاراً لليبيا.

5. التوصيات

بناءً على التقييم الشامل للجدوى الاقتصادية والآثار الاستراتيجية لمشروع تحويل إطارات النفايات إلى وقود غازي في الزاوية، ليبيا، تُقدم هذه الدراسة التوصيات التالية بهدف ترجمة النتائج الواعدة إلى إجراءات ملموسة، مما يُسهم في تعظيم الفوائد البيئية والاقتصادية والاستراتيجية للمشروع في الزاوية وليبيا ككل:

- تأسيس شراكات استراتيجية بين القطاعين العام والخاص: نُوصى بشدة بتشكيل تحالفات قوية بين الجهات الحكومية الليبية (مثل وزارة النفط والغاز، وزارة الحكم المحلي، الهيئة العامة للبيئة) والقطاع الخاص المحلي والدولي. هذا التعاون من شأنه أن يُسهل توفير التمويل، ونقل الخبرات التقنية والإدارية، وتوزيع المخاطر، مما يُعجل بتنفيذ المشروع ويضمن استدامته.
- وضع إطار تنظيمي وقانوني داعم: يجب على السلطات الليبية تطوير أو تحديث الأطر القانونية والتنظيمية التي تُشجع على الاستثمار في مشاريع تحويل

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/rfbb8012

النفايات إلى طاقة. يمكن أن يشمل ذلك تقديم حوافز ضريبية، وتسهيل إجراءات التراخيص، ووضع سياسات شراء واضحة للغاز التخليقي أو الطاقة المُنتجة منه، مما يُعزز من جاذبية الاستثمار في هذا القطاع.

- إجراء دراسات سوق مفصلة للغاز التخليقي: على الرغم من الجدوى المالية الأولية، يُوصى بإجراء تحليل دقيق للسوق المحلية للغاز التخليقي. يجب أن تُحدد هذه الدراسات بشكل دقيق الاحتياجات الصناعية والطاقوية الحالية والمستقبلية في منطقة الزاوية والمناطق المجاورة، واستكشاف إمكانات بيع الوقود الغازي لقطاعات مثل الصناعة، أو محطات توليد الكهرباء، أو حتى تطويره كوقود للمواصلات.
- تطوير برامج بناء القدرات والتدريب المهني: لضمان استدامة المشروع ونجاحه على المدى الطويل، من الضروري الاستثمار في تدريب وتأهيل الكوادر الليبية. يجب تصميم برامج تدريب مهني متخصصة في تشغيل وصيانة منشآت تحويل النفايات إلى وقود غازي، بالإضافة إلى برامج لبناء القدرات في إدارة النفايات اللوجستية وتكنولوجيا الغاز التخليقي.
- دراسة إمكانية التوسع والتكامل الإقليمي: بالنظر إلى النجاح المحتمل في الزاوية، يُوصى بدراسة إمكانية تكرار هذا النموذج في مدن ليبية أخرى تواجه تحديات مماثلة في إدارة إطارات النفايات. كما يمكن استكشاف فرص التكامل الإقليمي لإنشاء شبكة وطنية لمعالجة النفايات وتوليد الطاقة، مما يُعظم الفوائد على المستوى الوطني.

تهدف هذه التوصيات إلى ترجمة النتائج الواعدة لهذه الدراسة إلى إجراءات ملموسة، مما يُسهم في تعظيم الفوائد البيئية، والاقتصادية، والاستراتيجية لتثمين إطارات النفايات عبر تحويلها إلى وقود غازي لمدينة الزاوية وليبيا ككل.

قائمة المراجع

[1] ETRMA-European Tyre & Rubber Manufacturers' Association. https://www.etrma.org/

[2] Reda Fhelboom, Mohamed Alrefady ,Abdalaleem Abdalsalam Alshreef, Waseem buriyag. (2019). "*Design of a Waste Tyres Gasification Plant to Produce Syngas in Zawia City"*, Final

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/rfbb8012

year B.Sc graduation project in Chemical Engineering, University of Zawia, Libya .

[3] Omar Jitlayi, Abd alhakim Al majdop & Wanis Shabish. (2016).” *Feasibility Study for Waste Tyre Recycle in Misrata City*”, ICCPGE- Al-Mergib University, Libya.

[4] Jalal Etriki. (2013) “*Municipal solid waste management and institutions in Tripoli, Libya: applying the Environmentally Sound Technologies (ESTs) concept*”, a thesis submitted for the Degree of Doctor of Philosophy at The University Of Hull, The UK

[5] Sharma, V.K., Fortuna, F., Mincarini, M., Berillo, M. & Cornacchia, G. (2000). “*Disposal of Waste Tyres for Energy Recovery and Safe Environment*“, Applied Energy Journal.

[6] Pilusa, J., Shukla, M. & Muzenda, E., (2014). “*Economic Assessment of Waste Tyres Thermal Treatment Technologies”*. International Journal of Research in Chemical, Metallurgical and Civil Engineering.

[7] Chris Higman & Maarten van der Burgt. Gasification, Second Edition, London: Elsevier.(2008)

[8] Gasification, Wikipedia, The Free Encyclopedia, https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Gasification&oldid=876962804 (Accessed December 2024).

[9] Prabir Basu. Gasification, .(2018) “*Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory*”, Third Edition, Canada: Academic Press

[10] IRSG (International Rubber Study Group). (2023). *Rubber Statistical Bulletin*. Retrieved August 2025, from https://www.rubberstudy.com

[11] Reda Fhelboom, Mohamed Alrefady ,Abdalaleem Abdalsalam Alshreef, Waseem buriyag. (2024) “*Waste Tyres in Zawia City, Challenges and shortcomings”,* International Science and Technology Journal. Volume 33 Part 2

[12] Hrbek, J. .(2016) “*Status Report on Waste Gasification in Countries Participating in IEA Bioenergy*.”, Vienna University of Technology

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية

http://www.doi.org/10.62341/rfbb8012

[13] L I Fajimi, B.O. OboirienB., (2023), *A techno-economic study on the co-production of syngas and activated carbon from waste tyre gasification process*, Journal of Material Cycles and Waste Management https://www.researchgate.net/publication/373617943_A_techno-economic_study_on_the_co-production_of_syngas_and_activated_carbon_from_waste_tyre_gasification_process

[14] Adhikari, B., De, D. & Maiti, S. (2000). "*Reclamation and Recycling of Waste Tyres. Progress in Polymer Science*". University of Oxford, England.

[15] Hita, I., Arabiourrutia, M., Olazar, M., Bilbao, J., Arandes, J.M. & Sánchez, P.C. (2016). "*Opportunities and Barriers for Producing High Quality Fuels from Scrap Tyres*". University of The Basque Country, Spain.

[16] GENERON® Gas Solutions, https://www.generon.com/product/hydrogen-sulfide-h2s-removal...(Accessed January 2025).

Copyright © ISTJ
حقوق الطبع محفوظة
للمجلة الدولية للعلوم والتقنية