المجلة الدولية للهندسة وتقنية المعلومات
journal homepage:www.ijeit.misuratau.edu.ly
IJEIT
جامعة مصراتة MISURATA UNIVERSITY

دراسة جدوى تحويل النفايات البلدية الصلبة كمصدر للطاقة الكهربائية المستقبلية لمدينة طرابلس - ليبيا

د. نوري أحمد الكـــشريو
قسم الهندسة الميكانيكية والصناعية - كلية الهندسة
جامعة طرابلس - طرابلس، ليبيا
n.alkishriwi@uot.edu.ly

م. جميلة إبراهيم مطر
جامعة الدول العربية، إدارة الطاقة
القاهرة، مصر
jamila.matar@las.int

الملخص – **تشهد ليبيا طلباً متزايداً على الطاقة تعتمد في مجابهته على حرق المزيد من الوقود الهيدروكربوني الناضب والملوث للبيئة، في حين أن النفايات يمكن ان تكون مصدراً مهماً لسد العجز في الإمداد الطاقي في البلاد والحد من التلوث البيئي. تعتبر النفايات الصلبة مشكلة طويلة الأمد في ليبيا بشكل عام وفي المناطق الحضرية بشكل خاص. حيث أدت التنمية الاقتصادية والنمو السكاني الحضري إلى توليد كميات متزايدة من النفايات الصلبة البلدية التي تفوق القدرة الحالية للمدافن الصحية والمكبات العشوائية المفتوحة الموجودة بها. تنتج ليبيا سنويًا حوالي مليوني طن من النفايات الصلبة البلدية. تكتسب النفايات البلدية الصلبة أهمية في السنوات الأخيرة لدورها في التنمية الاقتصادية والمستدامة. أدى التطور الاقتصادي والنمو السكاني إلى تراكم النفايات الصلبة بشكل يفوق القدرة الحالية لمدافن ومناطق الطمر. تناولت هذه الدراسة جدوى بناء محطة توليد الكهرباء من النفايات إلى طاقة (Waste to energy) في مدينة طرابلس بليبيا. تم إجراء تحليل فني – اقتصادي لأداء محطة توليد الطاقة من النفايات بتقنية الحرق باعتبارها أكثر التقنيات انتشارا في العالم وأكثرها نضوجا من النواحي الفنية والاقتصادية على أساس الظروف الخاصة بمدينة طرابلس. أظهرت النتائج أن المنشأة المقترحة تصل قدرتها الى حوالي 100 ميجاوات حرارة من النفايات بناء على سيناريو الحرق كمرحلة أولى. باستخدام برمجية متخصصة SAM صادرة عن المعامل الوطنية للطاقات المتجددة الأمريكية NREL تم حساب إنتاجية محطة لإنتاج الكهرباء بسعة 27 ميجاوات، يمكنها إنتاج ما يصل إلى 201 ميجاوات ساعة من الطاقة الكهربائية سنويًا، بتكلفة تصل الى 100.7 دولار/ميجاوات ساعة. تم دراسة تأثير التغيير في هذه الفرضيات سواء الخاصة بالتكاليف الثابتة أو التكاليف السنوية من خلال دراسة الحساسية.**

كلمات مفتاحية: **النفايات، مصادر الطاقة المتجددة، التقنيات النظيفة، الاحتراق النظيف، التحليل الفني والاقتصادي.**

1. مقدمة

تمثل النفايات تحديا على المستوى العالمي ينذر بعواقب صحية ومالية وبيئية خطيرة إذا لم يتم التعامل معها بصور سليمة وهي مشكلة تتصل بكيفية إنتاج المجتمعات واستهلاكها. لقد أدى النمو السكاني السريع والتحضر في جميع أنحاء العالم إلى مشكلة إنتاج النفايات بكميات كبيرة، ومن المتوقع أن تستمر بمعدل عالي. ففي عام 2016 أنتجت مدن العالم أكثر من ملياري طن من النفايات الصلبة، ومن المتوقع أن يرتفع هذا الرقم بحلول عام 2050 بنسبة 70% أي إلى 3.4 مليار طن وفقا لإحصائيات البنك الدولي سنة 2018، [1]. فجميع سكان كوكب الأرض سواء كانوا يعيشون في البلدان الصناعية أو في البلدان النامية، في المدن الكبيرة أو الصغيرة، أو سواء كانوا أغنياء أو فقراء ينتجون كميات هائلة من النفايات، مع الأخذ في الاعتبار أن كمية النفايات المنتجة تعتمد على مستوى الدخل ونوع المنطقة أكانت حضرية أم ريفية والسكان، وحجم المدينة والثقافة وأسلوب الحياة. تختلف طريقة معالجة النفايات بين الدول النامية والدول المتقدمة اختلافا كبيرا من حيث طرق المعالجة.

ففي الدول النامية وعلى الرغم من المخاطر الصحية، يعتبر إلقاء النفايات في الأماكن المفتوحة أو الأراضي الشاغرة أو الممرات المائية ممارسة شائعة لأنها أقل تكلفة وأسهل من اعتماد نظام للتخلص من النفايات السليمة بيئياً، حيث يتم وضع حوالي 93% من النفايات في مكبات النفايات المفتوحة والغير المنظمة أو حرقها علانية. فبالإضافة إلى التداعيات الخطيرة على الصحة والسلامة، فإن العواقب البيئية كبيرة، وتساهم في تغير المناخ العالمي بالإضافة إلى خلق تلويث الهواء، وتأثير التنوع البيولوجي، وتلوث المياه الجوفية، وتدهور خصوبة التربة وتؤدي في النهاية إلى خسائر اقتصادية وبيئية وبيولوجية كبير جدا وفي بعض الأحيان غير قابلة للتعافي [1].

يتراوح إنتاج النفايات الناتجة لكل فرد في العالم في اليوم بين 0.11 إلى 4.54 كيلوغرام، بينما يبلغ المتوسط العالمي 0.74 كيلوغرامًا لكل فرد في اليوم. فالبلدان ذات الدخل المرتفع على الرغم من أنها تمثل 16% من سكان العالم، تولد حوالي 34%، أو 683 مليون طن من نفايات العالم. فهناك بشكل عام ارتباط وثيق بين توليد النفايات ومستوى الدخل. ولكن من المتوقع أن يزيد توليد النفايات اليومية للفرد في البلدان المنخفضة والمتوسطة الدخل، حيث من المتوقع أن يرتفع بنسبة تقارب 40% أو أكثر مقارنة بالبلدان ذات الدخل المرتفع حيث من المتوقع ان تزداد بنسبة 19% بحلول عام 2050. أي أن معدل توليد النفايات سيزداد بشكل عام بمعدل أسرع للتغيرات الإضافية في الدخل عند مستويات دخل أقل مما هو عليه في مستويات الدخل المرتفع. من المتوقع أيضا أن تزيد الكمية الإجمالية للنفايات المتولدة في البلدان المنخفضة الدخل بأكثر من ثلاث مرات بحلول عام 2050. وسوف تكون المناطق الأسرع نمواً هي مناطق جنوب الصحراء الكبرى وجنوب آسيا والشرق الأوسط وشمال أفريقيا؛ وبحلول عام 2050، من المتوقع أن يتضاعف إجمالي توليد النفايات ثلاث مرات لمناطق جنوب الصحراء والضعف لمناطق جنوب أسيا وشمال افريقيا والشرق الاوسط على التوالي. مع العلم أنه في هذه المناطق، يتم التخلص من أكثر من نصف النفايات في الوقت الحالي في المكبات العشوائية المفتوحة بشكل علني. ولهذا، سيكون لمسارات نمو النفايات المستقبلية آثار كبيرة على البيئة والصحة والازدهار، وبالتالي تتطلب إجراءات عاجلة [1].

تختلف خصائص ومكونات النفايات على حسب مستويات الدخل، مما يعكس أنماط الاستهلاك المتنوعة. فالبلدان ذات الدخل المرتفع تنتج كميات أقل من المواد العضوية أي بنسبة 32% من إجمالي النفايات وتولد المزيد من النفايات الجافة التي يمكن إعادة تدويرها بما في ذلك البلاستيك والورق المقوى (الكرتون) والورق والمعادن والزجاج والتي تمثل 51% من النفايات. اما البلدان المنخفضة الدخل تنتج في العموم حوالي 56% من النفايات العضوية من إجمالي النفايات، بينما تمثل المواد التي يمكن إعادة تدويرها 16% فقط من النفايات، بينما تنتج البلدان المتوسطة الدخل حوالي 53% نفايات عضوية. يتم التخلص حاليا من حوالي 37% من النفايات على الصعيد العالمي في مكبات النفايات، بينما 8% منها يتم وضعها في مدافن صحية مع أنظمة لتجميع الغاز (طاقة) من المكبات. تمثل نسبة النفايات الملقاة في المكبات المفتوحة حوالي 33% من النفايات، أما نسبة النفايات المعاد تدويرها أو تم تحويلها الى سماد فتقدر بحوالي 19%، ويتم حرق 11% للتخلص النهائي منها. يعتبر التخلص من النفايات أو معالجتها

استلمت الورقة بالكامل في 27 اكتوبر 2020 وروجعت في 20 مارس 2021
وقبلت للنشر في 12 ابريل 2021،

ونشرت ومتاحة على الشبكة العنكبوتية في 30 ابريل 2021.

بشكل كافي مثل مدافن النفايات الخاضعة للرقابة أو المنشآت التي تعمل بشكل أكثر صرامة للشروط الصحية والبيئية نطاقًا حصريًا للبلدان ذات الدخل المرتفع والمتوسط. تعتمد البلدان ذات الدخل المنخفض بشكل عام على القاء النفايات في المكبات المفتوحة غير المنظمة أو حرقها علانية حيث يتم رمي أكثر من 93% من النفايات في البلدان المنخفضة الدخل و2% فقط في البلدان ذات الدخل المرتفع. تعتبر إدارة النفايات الصلبة واحدة من أكثر المهام الصعبة للحكومات المحلية في جميع أنحاء العالم. فالزيادة المستمرة في توليد النفايات، وتقلص المساحة المتاحة للتخلص منها من جهة والمخاطر الصحية والبيئية من جهة أخرى تدعو الى ضرورة معالجتها بأسرع ما يمكن. فوفقًا لتقرير مجلس الطاقة العالمي، من المتوقع أن يتضاعف توليد النفايات الصلبة البلدية بحلول عام 2025 إلى أكثر من 6 ملايين طن من النفايات يوميًا، [2]. ومن المتوقع أيضًا أن ترتفع التكلفة العالمية السنوية لمعالجة هذه النفايات من 205 مليار دولار في عام 2010 إلى 375 مليار دولار بحلول عام 2025، [3]. يشار إلى أن 90% من المواد الخام المستخدمة في التصنيع تتحول الى نفايات قبل مغادرة المنتج المصنع. بينما يتم التخلص من 80% من المنتجات المصنعة في الأشهر الستة الأولى من عمرها.

طورت وكالة حماية البيئة الأمريكية التسلسل الهرمي لإدارة المواد غير الخطرة والنفايات، والذي يصنف استراتيجيات إدارة النفايات من الأكثر إلى الأقل تفضيلًا بيئيًا. يركز التسلسل الهرمي على الحد وإعادة الاستخدام وإعادة التدوير كمفتاح للإدارة المستدامة للمواد، يليه استعادة الطاقة، ومن ثم التخلص من النفايات المتبقية على طرف الهرم [4]. فالتسلسل الهرمي للنفايات الصلبة يعد دفن النفايات هو أسواء الخيارات للتخلص منها بحيث يجب أن يتم تنفيذه بعد استنفاذ كل الإجراءات الوقائية الممكنة الأخرى من إعادة الاستخدام وإعادة التدوير والسماد ومن ثم استعادة الطاقة عن طريق تحويل النفايات الى طاقة. ينتج عن دفن النفايات إنتاج كميات كبيرة من الغازات الدفيئة بالإضافة الى التأثيرات السلبية الاخرى على صحة الإنسان وتلوث الهواء والتربة والمياه. بالإضافة إلى ذلك تحتوي النفايات الصلبة المحلية على معادن مختلفة، ومواد قابلة لإعادة التدوير ومكونات تحتوي على طاقة، والتخلص من هذا النوع من مواد النفايات يؤدي إلى فقدان الموارد الطبيعية وفرصة الحصول على الطاقة. علاوة على ذلك، تلعب تقنيات تحويل النفايات إلى طاقة أدوارًا مختلفة في الاقتصاد الدائري. حتى مع إعادة التدوير المكثف، هناك دائمًا نفايات بدون قيمة سوقية أو مادية. يمكن تحويل هذه النفايات ذات القيمة الحرارية المحددة إلى طاقة بدلا من استخدام الوقود الأحفوري.

تعتبر معالجة النفايات باستخدام التقنيات المختلفة لتحويل النفايات إلى طاقة خيارًا عمليًا للتخلص من النفايات البلدية الصلبة وتوليد الطاقة. فعمليات تحويل النفايات إلى طاقة (Waste to Energy-WtE) تلعب دورًا مهمًا في الإدارة المستدامة للنفايات البلدية الصلبة (Municipal Solid Waste-MSW) في جميع أنحاء العالم، حيث تهدف سياسات التنمية المستدامة إلى الحد من النفايات وإعادة تدويرها، وكذلك استخدامها لإنتاج الكهرباء. فصناعة تحويل النفايات الى طاقة تنمو بسرعة في جميع أنحاء العالم لأنها تقلل من الطلب على مدافن النفايات، والاعتماد على الوقود الأحفوري وتقلل من انبعاثات الغازات الدفيئة ولها تأثير إيجابي على النمو الاقتصادي [5]. صنفت وكالة حماية البيئة بالولايات المتحدة النفايات البلدية الصلبة كمصدر للطاقة المتجددة. من الناحية النظرية، يمكن اعتبار النفايات الصلبة البلدية موردًا متجددًا، نظرًا لأن تولدها مرتبط ارتباطًا جوهريًا بالنشاط البشري.

تعرّف عملية استرداد الطاقة من النفايات على أنها تحويل مواد النفايات الغير قابلة لإعادة التدوير إلى حرارة أو كهرباء، أو وقود قابل للاستخدام من خلال مجموعة متنوعة من العمليات، بما في ذلك الاحتراق، والتغويز، والتحلل الحراري، والتحلل اللاهوائي، واسترداد الغازات المتولدة من مدافن النفايات. غالبًا ما تسمى هذه العملية تحويل النفايات إلى طاقة. إن تحويل مواد النفايات غير القابلة لإعادة التدوير إلى كهرباء وحرارة يولد طاقة متجددة، ويقلل من انبعاثات الكربون عن طريق تعويض الحاجة إلى الطاقة من المصادر الأحفورية ويقلل من توليد غاز الميثان من مدافن النفايات. بعد استعادة الطاقة، يبقى ما يقرب 10% من الحجم على شكل رماد، والذي يتم إرساله بشكل عام إلى مكبات النفايات النهائية. من المهم ملاحظة أن محطات توليد الطاقة من النفايات باستخدام تقنية الحرق ليس هو نفسه محرقة النفايات المستخدمة في حرق النفايات لغرض تقليل حجم النفايات عن طريق حرقها لإنتاج رماد يتم التخلص منه في مكان آخر مثل المكبات. على النقيض من ذلك، يتم تصميم محطات توليد الطاقة من النفايات خصيصًا لتوفير طاقة قابلة للاستخدام ويمكن تصميمها بحيث تكون ذات إنتاج ضئيل أو معدوم لردم النفايات.

تختار الدول في جميع أنحاء العالم اعتماد استراتيجيات مختلفة، بناء على المعايير والقيود الاجتماعية والاقتصادية والبيئية الخاصة بها. حيث يمكن أن يكون لهذه القرارات تأثير على أمن الطاقة والاستدامة البيئية عند النظر إلى مستقبل قطاع الطاقة. إذا تم تطوير وتنفيذ تقنيات تحويل النفايات إلى طاقة، مع اتباع مبادئ الاستدامة، عندها يمكن تحقيق استراتيجية معالجة نفايات صحيحة وإنتاج طاقة صديقة للبيئة في نفس الوقت، والمساهمة في مجابهة التحديات في كل من إدارة النفايات والطاقة. هناك العديد من العوامل التي تؤثر على اختيار التقنية الملائمة لمعالجة النفايات، وبالتالي يتعين على كل منطقة او مدينة تقييم سياقها المحدد بشكل صحيح لتنفيذ الحل الأكثر منطقية. يمكن أن يختلف التفاعل بين حلول إدارة النفايات وتقنيات إنتاج الطاقة بشكل كبير، اعتمادًا على عوامل متعددة.

ينمو سوق تحويل النفايات الى طاقة عالميًا بشكل سريع وبنسبة نمو عالية ومن المتوقع ازياد تسارع هذا النمو نتيجة للدعم الكبير لعدد كثير من الحكومات سواء من النواحي التشريعية أو من ناحية والإعانات والمزايا الضريبية في هذا المجال. فالحاجة إلى زيادة حصة الطاقة المتجددة في مزيج الطاقة للدول وخفض انبعاثات الغازات الدفيئة إلى جانب رفع الوعي البيئي لحماية البيئة من التلوث والممارسات غير المستدامة مثل دفن النفايات سيكون لها تأثير إيجابي على تطوير هذ السوق. بالإضافة إلى ذلك، مع نمو توليد النفايات، سيكون هناك مساحة كافية في السوق للداخلين الجدد، [2]. بشكل عام، من المتوقع أن تشجع السياسات التحفيزية للحكومات على تعزيز دعم السياسات والدعم المالي لمشاريع تحويل النفايات الى طاقة، والتي تفيد في تسريع تطوير هذه الصناعة. وقد بلغ إجمالي القيمة السوقية العالمية لقطاع صناعة الطاقة من النفايات 24 مليار دولار في عام 2012 بمعدل نمو مركب 5.5%. فمن المتوقع أن يرتفع السوق العالمي لتحويل النفايات إلى طاقة 35.5 مليار دولار بحلول عام 2019. فمرة أخرى، تعتبر التكاليف المتزايدة لإنتاج الطاقة، والمخاطر البيئية التي تشكلها النفايات الخطرة، وتحول سياسات وتشريعات البلدان المتقدمة نحو تحويل النفايات إلى طاقة عوامل أخرى تساهم في معدل النمو المرتفع هذا. إن تقليل مساحة مكب النفايات وأمن الطاقة هما أيضًا عاملين رئيسيين يدفعان الى تحويل النفايات إلى سوق توليد الطاقة [6].

في المنطقة العربية، يتمثل الهدف من معالجة النفايات الصلبة في المساهمة في الحد من التأثير البيئي بشكل عام والتخفيف من آثار تغير المناخ الذي قد ينشأ بطريقة أخرى عن القاء النفايات في المكبات المفتوحة غير المنظمة أو الحرق في الهواء الطلق أو دفن النفايات. كما يساعد تقليل حجم النفايات عن طريق تحويل النفايات الى طاقة على توفير مساحات الأراضي وتقليل انبعاثات الغازات الدفيئة، وتلوث المياه السطحية والجوفية والتربة وحماية البيئة. لذلك تعد الإدارة الفعالة للنفايات شأنا محوريا للمستقبل المستدام للمنطقة العربية وهي عنصر حاسم للحفاظ على الموارد الطبيعية للدول العربية. فتزايد حجم النفايات بالدول العربية يدعو الى ضرورة الإسراع في التركيز على إعادة التدوير وإعادة الاستخدام واستعادة الطاقة. بالإضافة الى ذلك، فإن عملية معالجة النفايات في المنطقة العربية يمكن أن يسفر عن خلق فرص عمل جديدة. وبذلك تصبح مشكلة النفايات فرصة اقتصادية يمكن من خلالها استعادة الموارد المهمة. لذلك يجب تركيز التحرك نحو ما يسمى الاقتصاد الدائري بدل من الاقتصاد الخطي الحالي إلى حد كبير باقتصاد يتم فيه تداول الموارد بقيمة عالية، وتجنب أو تقليل الحاجة إلى الموارد الأولية وتقليل النفايات المتبقية والملوثات والانبعاثات. يمكن أن تساعد التقنيات الحرارية مثل الحرق الذي يتوافق مع معايير الانبعاثات البيئية في تدمير المواد العضوية السامة وإزالتها من التدفق الدائري للمواد. أجرى عدد من الناشرين، [3] سنة 2017 بحثًا حول إدارة النفايات الصلبة البلدية وتحويلها الى طاقة في سياق الاقتصاد الدائري في أوروبا، وخلصوا إلى أن تقنيات تحويل النفايات الى طاقة تلعب دورًا في الاقتصاد الدائري من خلال التضافر والترابط بين سياسات دول الاتحاد الأوربي في مجالات إدارة النفايات وحماية البيئة وسياسات الطاقة والتي تمكن الدول الأعضاء من تحقيق أهداف سياساتها لا سيما فيما يتعلق بكفاءة استخدام الموارد وكفاءة الطاقة. فمن بين الخيارات التي تم استكشافها حول العالم لمواجهة مشكلة النفايات، يعد توليد الطاقة من النفايات البلدية أحد أكثر الحلول جاذبية [7]. علاوة على ذلك، هناك تناظر جيد بين الطلب المتزايد على الطاقة وكمية النفايات البلدية المتولدة، مما يجعل خيار تحويل النفايات إلى طاقة أكثر جاذبية. فالهدف من نظام إدارة النفايات الحديث ليس التخلص من منتجات النفايات فقط ولكن تزويد الاقتصاد بالمواد الخام الثانوية والطاقة من النفايات.

على الرغم من وجود عدد من الدراسات الخاصة بدراسات الجدوى الاقتصادية لمشاريع محطات تحويل النفايات الى طاقة في بعض بلدان المنطقة العربية، إلا أن هناك نقصًا في التحليلات الاقتصادية لهذه المشاريع بالدول الأخرى. ستعرض هذه الورقة أحدث تطورات صناعة انتاج الطاقة من النفايات في العالم والمنطقة العربية وآفاق نمو سوق صناعة الطاقة من النفايات في بالخصوص بالدول العربية. بناءً على السياسات الحالية وحالة صناعة هذا القطاع، تقدم هذه الورقة تحليلاً اقتصاديًا شاملاً ومفصلاً لمحطات تحويل النفايات الى طاقة. تؤخذ في الاعتبار طرق التمويل المختلفة لهذا النوع من المشاريع وتعرفة التغذية، والإيرادات ورسوم البوابة (دعم التخلص من النفايات)، وتناقش الربحية والقدرة على سداد الديون. أيضا تم إجراء تحليل الحساسية لعدد من المتغيرات وذلك لفهم كيف يمكن أن تتأثر المؤشرات الاقتصادية الرئيسية عندما تتغير بعض العوامل.

الهدف من هذه الورقة هو دراسة إمكانات تقنيات تحويل النفايات إلى طاقة لحل مشكلة النفايات في المنطقة العربية. للوصول إلى هذا الهدف، تم إجراء مراجعة لحالة إدارة النفايات الحالية في المنطقة. فقد تم جمع البيانات من مصادر مختلفة لرسم صورة شاملة عن حالة النفايات بالدول العربية. بعد ذلك، يتم تقديم استراتيجية النفايات في الدولة، بما في ذلك بعض القوانين واللوائح ذات الصلة، ومناقشة فعاليتها. تم إجراء مراجعة تقنيات النفايات المتاحة للطاقة في العالم. تشمل التقنيات: حرق النفايات، التحلل اللاهوائي، الانحلال الحراري والتغويز. تم مقارنة نقاط القوة والضعف للتقنيات المختلفة أخذا في الاعتبار مقارنات تلوث الهواء والتكلفة والمنتجات الجانبية والقدرة والنضج التجاري والكفاءة ونوع النفايات المعالجة المرتبطة بكل تقنية. الجزء الثاني من الورقة تم تخصيصه لدراسة حالة. حيث تم اختيار العاصمة الليبية طرابلس لإجراء دراسة جدوى فنية واقتصادية لمشروع تحويل النفايات الى طاقة باستخدام تقنية الحرق لمحطة بسعة 1000 طن من النفايات في اليوم.

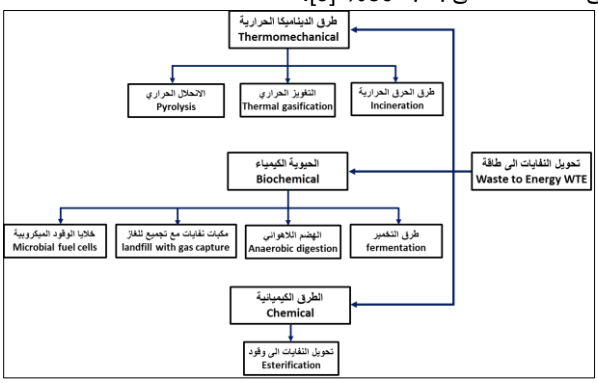
2. تقنيات تحويل النفايات الى طاقة

إن تحويل النفايات إلى طاقة ليس طريقة جديدة لتوليد الطاقة، مع الخطوات الأولى في الطريقة التي يعتقد أنها اتخذت في وقت مبكر من القرن الثامن عشر، لكن الممارسة اكتسبت أهمية مع زيادة مشكلة النفايات، لا سيما منذ دورة الألفية.

تشير عمليات تحويل النفايات إلى طاقة إلى مجموعة متنوعة من تقنيات المعالجة التي تحول النفايات إلى كهرباء أو حرارة أو وقود أو مواد أخرى قابلة للاستخدام، بالإضافة إلى مجموعة من المخلفات بما في ذلك الرماد المتطاير والحمأة والخبث. بناءً على تقنيات تحويل النفايات الى طاقة (الشكل رقم 1)، يمكن تصنيف عمليات تحويل النفايات الى طاقة إلى ثلاثة أنواع رئيسية: طرق الحرارية-الكيميائية والكيميائية الحيوية والطرق الكيميائية. في التسلسل الهرمي لإدارة النفايات، يمكن أيضًا تصنيفها إلى عمليات التخلص أو عمليات الاستعادة أو إعادة التدوير الأخرى، وفقًا لمنتجات الطاقة المنتجة ومستوى الاسترداد. يمكن وصف التقنيات المختلفة لإنتاج الطاقة من النفايات كما يلي:

1. *حرق النفايات الصلبة البلدية* (Mass-Burn Incineration)

تعتبر تقنية حرق النفايات لإنتاج الطاقة هي أكثر التقنيات نضجًا لاستخراج الطاقة من النفايات في العالم الان [7]. تتضمن العملية حرق النفايات في الأفران واستخدام الحرارة المنتجة لتوليد طاقة في شكل كهرباء أو حرارة. حرق النفايات الصلبة البلدية هو حرق النفايات في عملية خاضعة للتحكم والرقابة داخل منشأة معينة تم بناؤها لهذا الغرض. الهدف الأساسي لحرق النفايات الصلبة البلدية هو تقليل حجم النفايات وكتلتها وجعلها خاملة كيميائيًا في عملية الاحتراق دون الحاجة إلى وقود إضافي (احتراق ذاتي). كأثر جانبي يمكّن أيضًا من استعادة الطاقة والمعادن والفلزات من النفايات [8]. إن عملية تحويل النفايات الى طاقة حرارية تخفّض كتلة النفايات بنسبة 75% وحجمها بنسبة 90%. يوجد دائمًا حوالي 25% من بقايا عملية الحرق على شكل خبث (رماد سفلي) ورماد متطاير. يتكون الرماد السفلي من جسيمات دقيقة تسقط إلى قاع المحرقة أثناء الاحتراق، بينما تخرج الجسيمات الدقيقة المتطايرة في غازات العادم التي يجب إزالتها في معالجة غاز المداخن [9]. تحترق المواد القابلة للاحتراق في النفايات عندما تصل إلى درجة حرارة الاشتعال الضرورية مع توفر الأكسجين، بحيث تتم عملية تفاعل الأكسدة في المحرقة. تتراوح درجة حرارة التفاعل بين 850 و1450 درجة مئوية، وتتم عملية الاحتراق في الطور الغازي والصلب مصحوبا بإطلاق كمية كبيرة من الطاقة الحرارية في نفس الوقت. تعتمد كمية الطاقة الحرارية الناتجة على القيمة الحرارية للنفايات. لضمان عملية احتراق النفايات ذاتيا دون إضافة أي وقود خارجي فانه يشترط ان تكون النفايات لها قيمة دنيا ن القيمة الحرارية لضمان التفاعل الحراري المتسلسل واحتراق ذاتي كامل (يسمى الاحتراق الذاتي للحرارة)، أي ليست هناك حاجة لإضافة أنواع وقود أخرى. أثناء الحرق، يتم تكون غازات العادم التي، بعد التنظيف، تخرج إلى الغلاف الجوي عبر المداخن. تحتوي غازات المداخن على غالبية طاقة الوقود المتاحة كحرارة، بالإضافة إلى الغبار وملوثات الهواء الغازية التي يجب إزالتها عبر عملية تنقية غاز المداخن. يتم استخدام الطاقة الحرارية الناتجة من الاحتراق في توليد البخار اللازم للتوربينات البخارية لتوليد الكهرباء، أو التدفئة أو التبريد المناطقي، أو في تحلية المياه او في العمليات الصناعية المختلفة. يمكن للمحطات التي تستخدم التوليد المشترك للطاقة الحرارية (التدفئة والتبريد) مع توليد الكهرباء أن تصل إلى الكفاءات المثلى بنسبة 80% [9].



الشكل رقم 1: تقنيات تحويل النفايات إلى طاقة

2. *الوقود الصلب من مرفوضات القمامة* (Refuse Derived Fuel-RDF)

طورت العديد من الشركات الأمريكية تقنيات تقوم بمعالجة النفايات الصلبة مسبقًا بدرجات متفاوتة لفصل المواد غير القابلة للاحتراق عن النفايات. من خلال الخضوع لخطوات المعالجة المختلفة، يتم تحويل الجزء القابل للاحتراق من النفايات إلى وقود، والذي يمكن بعد ذلك استخدامه في غلايات إنتاج البخار لمحطات الكهرباء خاصة لهذا النوع من الوقود المشتق من النفايات، أو استخدامه مع نوع آخر من الوقود مثل الفحم أو الإطارات الممزقة أو رقائق الخشب.

الوقود الصلب المشتق من النفايات (يسمى كذلك الوقود الصلب من مرفوضات القمامة) (Refuse Derived Fuel-RDF) هو عملية تحويل النفايات الصلبة البلدية المصنفة إلى حبيبات كثيفة تحترق بشكل أكثر كفاءة من النفايات الصلبة المحلية غير المعالجة وغير المصنفة. تتراوح درجات الحرارة في عملية الاحتراق بين 800 إلى 1000 درجة مئوية، ويكون الاحتراق أكثر كفاءة إذا كانت نسبة الرطوبة في النفايات الصلبة البلدية أقل من 50%. كذلك يشترط أن تكون النفايات المستخدمة متجانسة نسبيًا ذات خصائص محددة لضمان الاحتراق المحكوم. يتم استخدام الوقود الصلب من مرفوضات القمامة في جميع أنحاء العالم بشكل رئيسي في صناعة الأسمنت ومحطات الطاقة الحرارية، في حالات قليلة يتم تطبيقه أيضًا في صناعة الفولاذ والجير. في صناعة الاسمنت الأوروبية، يمكن أن يصل معدل الإحلال الحراري للوقود التقليدي بالنفايات إلى 80% [10]. في السنوات الاخيرة بدأ استخدام هذه التقنية أيضا في عدد من البلدان النامية والناشئة في مصانع الاسمنت بشكل واسع، الا انها لا تزال تمثل نسبة منخفضة مقارنة بأنواع النفايات الأخرى مثل الإطارات المستعملة، والنفايات الصناعية الخطرة وبقايا الكتلة الحيوية أو الحمأة المستخرجة من محطات معالجة مياه الصرف الصحي [9]. عادة ما يتم تغذية الوقود المشتق من النفايات لعملية الاحتراق باستخدام نظام منفصل للوقود الصلب المشتق. يمثل الاستبدال المباشر للوقود الأساسي في عملية الإنتاج (أفران الاسمنت) استعادة طاقة أكثر كفاءة بشكل ملحوظ من تكنولوجيات النفايات الأخرى للطاقة، وعادة ما تحقق 85-95% اعتمادًا على خصائص النفايات [9].

3. التخمر اللاهوائي لإنتاج الغاز الحيوي (Anaerobic Digestion for Biogas Production)

التخمر اللاهوائي (Anaerobic Digestion for Biogas Production-AD) هو تحلل المواد العضوية من خلال الكائنات الحية الدقيقة في غياب الأكسجين. يمكن أن تحدث عمليات التخمر اللاهوائي بشكل طبيعي في غياب الأكسجين او يمكن أن يحدث في ظروف محكومة لإنتاج الغاز الحيوي. لهذا الغرض، يتم استخدام مفاعل الغاز المحكم، يسمى ما يسمى بالتخمر اللاهوائي، لتوفير ظروف مواتية للكائنات الحية الدقيقة لتحويل المواد العضوية، والمواد الخام المدخلات، إلى غاز حيوي وبقايا صلبة سائلة. يمكن استخدام تقنية التخمر اللاهوائي كسماد عضوي عندما يتم فصل المادة الأولية عن النفايات العضوية غير الملوثة. تحدث عملية التخمر اللاهوائي في ثلاث خطوات: تحلل البكتيريا في النبات أو الحيوان إلى جزيئات مثل السكر وتحويل المواد المتحللة إلى أحماض عضوية وتحويل الأحماض العضوية إلى غاز الميثان. الغاز الحيوي هو مزيج من الغازات المختلفة التي يمكن تحويلها إلى طاقة حرارية أو كهربائية أو كليهما. يعتبر غاز الميثان القابل للاشتعال الناقل الرئيسي للطاقة في الغاز الحيوي ويتراوح محتواه بين 50-75% اعتمادًا على المواد الأولية وظروف التشغيل [11]. نظرًا لمحتوى الميثان المنخفض، تبلغ قيمة التسخين للغاز الحيوي حوالي ثلثي الغاز الطبيعي (5.5 إلى 7.5 كيلو واط ساعة /م^3). في جميع أنحاء العالم ، يوجد ما يقرب من 12000 مصنع للغاز الحيوي في عام 2016 ومن المتوقع أن ينمو إلى 15000 بحلول عام 2025 [12]. الجزء الأكبر، أي حوالي 90% من هذه المحطات موجودة في أوروبا وأقوى أسواق الغاز الحيوي موجودة في ألمانيا وفرنسا وإيطاليا وبولندا. ومع ذلك، فإن هذه التكنولوجيا أقل نضجًا وأقل شعبية من تقنية حرق النفايات وتحويلها إلى طاقة.

4. تجميع غاز المدافن الصحية (*Landfill Gas-LFG Capture*)

يمثل تجميع غاز المدافن الصحية (Landfill Gas-LFG) نوعًا مختلفًا من تقنيات تحويل النفايات إلى طاقة مقارنة بالأنواع الأخرى السابقة. فهو يعتبر في الأساس طريقة للتقليل من التأثيرات المناخية السلبية من تشغيل مدافن الصرف الصحية. إن مدافن الصرف الصحي هي طريقة معتمدة ومقبولة دوليًا في البلدان النامية وفي كثير من الحالات الخيار الوحيد لمعالجة وتخزين النفايات المجمعة بطريقة خاضعة للرقابة. على الرغم من أن المدافن الصحية هي طريقة لتحسين ومعالجة المكبات المفتوحة، إلا أن لها أيضًا تأثيرات بيئية سلبية طويلة المدى مثل انبعاث غاز الميثان والذي يؤدي الى الاحتباس الحراري في الغلاف الجوي بشكل كبير جدا، وفقدان الموارد القيمة في هذه المدافن وانبعاث روائح سامة وكريهة. ينتج غاز المدفن من عملية الهضم اللاهوائي للمواد العضوية في المدفن. حيث يتكون هذا الغاز من 45-55% من غاز الميثان، وبالتالي فهو مناسب كوقود لتوليد الحرارة أو توليد الطاقة، أو توليد الحرارة والطاقة بشكل مشترك أو كوقود للنقل. والباقي هو أساسا ثاني أكسيد الكربون. للحد من انبعاثات الغازات الدفيئة من مواقع دفن النفايات في الغلاف الجوي من الضروري التقاط وتجميع غاز الميثان عن طريق منظومة يتم تركيبها لتجميع الغاز. تم تنفيذ أكثر من 200 مشروع لجمع غاز المدافن بنجاح في إطار آلية التنمية النظيفة في بروتوكول كيوتو للتخفيف من انبعاثات غازات المناخ [13].

على مدى السنوات الأربعين الماضية، كان تطوير ما يسمى "التقنيات البديلة" للمعالجة الحرارية للنفايات يتجسد في خطوتين رئيسيتين. تميزت الخطوة الأولى في السبعينيات والثمانينيات بالدافع العالي وإمكانية الابتكار لتطوير تقنية شاملة وفعالة لمعالجة النفايات مع الحد الأقصى من إنتاج منتجات العملية من جهة والحد الأدنى من الآثار البيئية السلبية من جهة أخرى. هيمنت استراتيجيات التسويق على الخطوة الثانية في منتصف التسعينات. اعتبر التغويز والتحلل الحراري، لاحقًا أيضًا الانحلال الحراري للبلازما، بديلاً مجديًا تقنيًا وماليًا لحرق النفايات وتم تصنيفها بجودة كونها تقنية غير تلوث، مقارنة بالحرق. في الوقت الحاضر، لا يوجد مصنع لمعالجة النفايات الصلبة المحلية قيد التشغيل على نطاق أوسع في أوروبا أو أفريقيا أو أمريكا اللاتينية، وتعمل بعض المصانع في آسيا (اليابان بشكل رئيسي) والولايات المتحدة الأمريكية كعنصر متكامل في منظومة معالجة النفايات بشكل محدود. إن التقنيات المتقدمة ومتطلبات التشغيل واحتياجات إدخال النفايات المحددة للغاية والتكاليف الرأسمالية العالية تجعل من الصعب تطبيق هذه التكنولوجيا على نطاق واسع [11].

5. عملية الانحلال الحراري

الانحلال الحراري هو التحلل الحراري للمواد الخام عند درجات حرارة تتراوح من 650 إلى 1200 درجة مئوية في مفاعل به القليل من الأكسجين أو في غياب الأكسجين. عندما تتعرض المواد التي أساسها الكربون لدرجات حرارة عالية، تبدأ الروابط الكيميائية في الانكسار. اعتمادًا على درجة الحرارة، تؤدي هذه العملية إلى توليد الفحم الصلب والسوائل الزيتية والغازات مثل الهيدروجين وأول أكسيد الكربون والهيدروكربونات المتطايرة مثل الميثان على حسب درجة حرارة النظام. يُعرف هذا الخليط من هذه الغازات القابلة للاشتعال باسم غاز صناعي. بعد هذه العملية، يمكن استخدام الغاز أو الوقود الصناعي لتوليد الكهرباء باستخدام التوربينات الغازية. يمكن معالجة المخلفات الصلبة والسوائل الناتجة (الرماد، والفحم، والمعادن، والزيوت الحيوية، وما إلى ذلك) لإنتاج وقود صلب لمحطات. يولد الانحلال الحراري عادة 571 كيلوواط ساعة لكل طن من النفايات الصلبة البلدية [14].

6. تقنية التغويز

على غرار تقنية الانحلال الحراري، غالبًا ما يبدأ التغويز التقليدي بعد إزالة المواد القابلة لإعادة التدوير. يتم تغذية النفايات الصلبة البلدية المتبقية في محطة التغويز. يتم تسخين مفاعل التغويز إلى درجات حرارة تتراوح بين 800-1700 درجة مئوية. نتيجة لذلك يتولد غاز صناعي مختلط مع منتجات الاحتراق مثل ثاني أكسيد الكربون وبخار الماء. في كثير من الأحيان، يضاف البخار إلى العملية من أجل تعزيز إنتاج غازات الهيدروجين والهيدروكربونات. يتم تنظيف الغاز الصناعي لإزالة المكونات الخطرة ويمكن بعد ذلك استخدامها لتوليد الكهرباء. نظرًا لصغر كمية الهواء التي تنطوي عليها عملية التغويز، فإن الغاز المنتج له قيمة حرارية أعلى من عملية الانحلال الحراري. يمكن أن تؤدي عملية التغويز التقليدية إلى 685 كيلووات في الساعة لكل طن من النفايات الصلبة المحلية [14]. يتم إنتاج الغازات المختلطة والرماد والخبث والمعادن في نهاية التفاعلات في مفاعل التغويز. المواد الصلبة المتبقية مفيدة كركام الخرسانة والأسفلت.

7. عملية المعالجة بالبلازما

تعد عملية معالجة النفايات باستخدام قوس البلازما هي أكثر التقنيات المتاحة تقدمًا وكفاءة. يتم استخدام أقواس البلازما لسنوات لمعالجة منتجات النفايات ورماد المحارق، وتحويلها إلى خبث زجاجي غير خطير. يستخدم تيارًا كهربائيًا يمر عبر الغاز (الهواء) لإنشاء البلازما التي بدورها تحول النفايات الى غاز صناعي. تتراوح درجات الحرارة في هذه العملية من 4000 إلى 6000 درجة مئوية. كما هو الحال مع عملية التغويز التقليدية، فإن الغاز الصناعي الناتج المنتج يستخدم لتوليد الطاقة أو للتدفئة أو كمادة وسيطة كيميائية. البقايا الصلبة الناتجة من تغويز قوس البلازما فريدة من نوعها. منتج ثانوي شبيه بالزجاج، يعرف باسم الخبث الزجاجي في قاع المفاعل. السمة الجذابة لهذه المادة هي أن مكوناتها لا تتسرب. يتكون الخبث الزجاجي من معادن وزجاج تندمج معًا في مادة صلبة خاملة. يستخدم الخبث الزجاجي أكثر من الرماد الناتج عن التغويز التقليدي، بما في ذلك مواد العزل، وبلاط الأرضيات، وكتل الحدائق. من خلال استخدام تقنية قوس البلازما ، من الممكن توليد 816 كيلووات في الساعة لكل طن من النفايات الصلبة البلدية [14].

الجدول رقم (1) يبين خصائص كل تقنيات تحويل النفايات الى طاقة.

3. الفوائد الاقتصادية لمشاريع تحويل النفايات الى طاقة

على مدى السنوات الماضية، تم اكتساب خبرة كبيرة جدا في مجال تحويل النفايات الى طاقة، فوفقًا لبيانات التشغيل الفعلية التي تم جمعها من قطاع صناعة الطاقة من النفايات بالولايات المتحدة الامريكية، في المتوسط، يؤدي احتراق واحد طن من النفايات الصلبة البلدية في محطات توليد الطاقة الحديثة إلى توليد طاقة صافية تقدر بـــ 600 كيلووات ساعة من الكهرباء، وبالتالي هذا يكافئ تجنب حرق ربع طن من الفحم الأمريكي عالي الجودة أو برميل واحد من النفط. فعملية تحويل النفايات الى طاقة هو البديل الوحيد لدفن النفايات غير القابلة لإعادة التدوير، حيث تولد القمامة المتحللة ثاني أكسيد الكربون والميثان، وهو من الغازات الدفيئة القوية، على الأقل 25% منه يهرب إلى الغلاف الجوي حتى في المدافن الصحية الحديثة التي يتم تزويدها. بشبكة لجمع الغازات لتوليد الكهرباء بالمحركات و التوربينات [15]. مع العلم أن تأثير حجم من غاز الميثان - كغازات

الدفيئة - الذي يتسرب للهواء في مكبات النفايات على البيئة يعادل 21 مرة من نفس الحجم لثاني أكسيد الكربون. مع الأخذ في الاعتبار الكهرباء المولدة وانبعاثات الميثان التي تم تجنبها، أدت العديد من الدراسات المستقلة إلى استنتاج أن تقنيات تحويل النفايات الى طاقة تقلل من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري بما يقدر بـ 1 طن من ثاني أكسيد الكربون لكل طن من القمامة المحترقة بدلاً من دفنها. لذلك، بالإضافة إلى فوائد الطاقة المتولدة، فإن احتراق النفايات الصلبة البلدية بمحطات توليد الطاقة من النفايات إلى تقليل الغازات الدفيئة.

بالإضافة الى ذلك، ومع الأخذ في الاعتبار أن محطات توليد الطاقة من النفايات لا تتطلب مساحات كبيرة من الأراضي بل على العكس من ذلك حيث ان الأرض المطلوبة أصغر بكثير من تلك اللازمة لدفن نفس الكمية من النفايات الصلبة البلدية. من ناحية أخرى، في حال المكبات المفتوحة والمدافن الصحية لا يمكن استخدام المواقع القريبة منها لأي شيء آخر سوى تحويلها الى مدافن جديدة في المستقبل، بينما في حالة وجود محطات توليد الطاقة من النفايات في هذه المواقع فان المواقع المجاورة للمحطة يمكن تحويلها الى مناطق صناعية أو حقول زراعية.

بالرجوع الى تاريخ بناء محطات تحويل النفايات الى طاقة الموجودة بالعمل في العالم، يعتبر تحويل النفايات إلى طاقة مجديا اقتصاديًا. فتحليل البيانات الاقتصادية لمحطة بانكوك لتحويل النفايات الى طاقة، تبين أن كل المؤشرات الاقتصادية والمتمثلة في فترة استرداد رأس المال (6 سنوات) وصافي القيمة الحاضرة (6.5 مليون دولار) و معدل العائد الداخلي (IRR = 12.21%) تبين مدى جدوى المشروع في تايلاند، [16]. تعتبر الإيرادات السنوية من مبيعات الكهرباء والحرارة والمواد القابلة لإعادة التدوير من مشروع تحويل النفايات الى طاقة في مالطا كبيرة، حيث تتراوح من 9.1 إلى 14.8 مليون يورو/سنويا [17]. أيضًا، تحقق محطات تحويل النفايات إلى طاقة زيادة في الأرباح بنسبة 287% في ماليزيا. في الصين، تظهر محطة تحويل النفايات إلى طاقة في الصين أن صافي الربح في 2006 بلغ 3.31 مليون دولار وهو ما يمثل 12.7% من إجمالي الاستثمار، وبالتالي دفع هذا معدل العائد المستقر والمرتفع على الاستثمار والتطور السريع لمحطات تحويل النفايات إلى طاقة [18].في المملكة المتحدة، تتنوع مصادر الإيرادات من محطات تحويل النفايات الى طاقة، فبالإضافة الى مبيعات الكهرباء ورسوم الدعم من الحكومة المتمثلة فيما يسمى رسوم البوابة، هناك كذلك حوافز ضريبية ومبيعات الرماد المتبقي وبعض المواد المعدنية. حيث تصل نسبة مساهمة رسوم الدعم (رسوم البوابة) في الإيرادات حوالي 70-80%، والنسبة المتبقية والتي تتراوح بين 20-30% ناتجة عن بيع الكهرباء، بينا في الصين ، يمثل الدخل من مبيعات الكهرباء 70-85% من إجمالي الدخل ورسوم الدعم الى 15-30%، [18]. من جهة أخرى، تعتبر التعريفة الوطنية الموحدة (Feed-in-Tariff: FiT) لشراء الطاقة الكهربائية من منتجي محطات توليد الكهرباء من النفايات كما هو معمول به في مشاريع الطاقات المتجددة في عدد من الدول من العوامل الرئيسية لتشجيع إنشاء مشاريع محطات إنتاج الطاقة من النفايات كما هو الحال في الصين، حيث يتم تطبيق التعريفة الوطنية الموحدة لمشاريع انتاج الطاقة من النفايات عند 0.106 دولار / كيلوواط ساعة. بالنسبة للمنطقة العربية، أصدرت مصر سنة 2019 كذلك تعريفة وطنية الموحدة لمشاريع انتاج الطاقة من النفايات في إطار تشجيع إنشاء محطات توليد الكهرباء من النفايات.

4. دراسة الحالة

دراسة الحالة التي سيتم مناقشتها في هذه الورقة هي لمدينة طرابلس-عاصمة الدولة الليبية. تم اختيار طريقة المعالجة الحرارية بالحرق لأنها الأكثر استخدامًا ونضجا في العالم لتقنيات تحويل النفايات إلى طاقة. الغرض من دراسة هذه الحالة هو تقديم المعلومات اللازمة لإجراء دراسات الجدوى الفنية والاقتصادية بالدول العربية لمشاريع توليد الطاقة من النفايات، بما في دراسة نوعية وكمية نفايات الصلبة للبلديات المطلوبة لتقنيات الخرق تسليط الضوء على الوضع الحالي لنظام إدارة نفايات البلديات بالدول العربية وتقديم شرح مفصل لكل من التكاليف الثابتة والمتغيرة المتوقعة ورأس المال المطلوب ومصادر الإيرادات، وبالتالي حسابات العوائد الاقتصادية المتمثلة في صافي القيمة الحاضرة ومعدل العائد الداخلي وفترة استرداد رأس المال لهذه المشاريع.

4.1 خلفية دراسة الحالة لمدينة طرابلس

تواجه ليبيا مثل الدول العربية الأخرى مشاكل كبيرة في معالجة النفايات الصلبة البلدية، حيث تفاقمت هذه المخاطر بسبب اندلاع الحرب الأهلية في البلاد خلال السنوات الأخيرة. سجلت الدولة الليبية على مدى العقود الماضية نمواً كبيرا في الناتج المحلي الإجمالي، بسبب التوسع الكبير في صناعة النفط والغاز في الدولة والذي أدى الى تحسن مستوى المعيشة وزيادة عدد السكان من جهة، وحدوث توسع كبير في سوق العمل نتج عنه قدوم وجذب لملايين العمالة الأجنبية للبلاد من جهة أخرى. نصيب الفرد من الناتج المحلي الإجمالي للدولة هو رقم يرتبط ارتباطًا وثيقًا بمعدل إنتاج النفايات الصلبة. نتيجة لذلك ازداد معدل إنتاج النفايات الصلبة المحلية في ليبيا بشكل كبير خلال السنوات الماضية والذي بدوره خلق العديد من التكاليف البيئية والاجتماعية التي تحتاج إلى معالجة. تشير إحصائيات حكومية إلى إنتاج 2 مليون طن من النفايات في ليبيا في عام 2016 [1].

تبلغ مساحة ليبيا الكلية 1.76 مليون كيلومتر مربع. يحدها من الشمال البحر الأبيض المتوسط، ومن الشرق مصر، ومن الجنوب الشرقي السودان، ومن الجنوب تشاد والنيجر، ومن الغرب الجزائر وتونس. يمكن تمييز أربع مناطق جغرافية:(i السهول الساحلية التي تمتد على طول الساحل الليبي وتتنوع في العرض، ii) الجبال الشمالية التي تمتد بالقرب من السهول الساحلية وتشمل جبل نفوسة في الغرب والجبل الأخضر في الشرق، iii) الانحدارات الداخلية التي تغطي وسط ليبيا وتضم عدة واحات، iv) الجبال الجنوبية والغربية. بلغ إجمالي عدد السكان حوالي 6.85 مليون نسمة في حتى شهر ابريل لعام 2020، منهم 5.38 مليون نسمة في المناطق الحضرية أي ما يعادل 78.2% من السكان حضريون. قدر معدل النمو السكاني السنوي للفترة 2005-2015 بنسبة 0.8 في المائة في انخفاض حاد منذ الثمانينيات والتسعينيات، عندما كان 4.2 و2.8 في المائة على التوالي (برنامج الأمم المتحدة الإنمائي، 2008). يبلغ نصيب الفرد من الدخل حوالي 7,086 دولار أمريكي حسب إحصائيات الأمم المتحدة لسنة 2017.

تعتبر البلديات في الدولة الليبية هي المسؤولة عن جمع ونقل والتخلص النهائي من النفايات الصلبة البلدية. تتعاقد معظم البلديات على خدمات إدارة النفايات مع القطاع الخاص من خلال تقديم عروض علنية لخدمات الجمع والتخلص. تعمل كل بلدية بشكل مستقل وبالتالي لا يوجد سعر ثابت لهذه الخدمة، وتتحمل البلديات تكاليف جمع النفايات والتخلص منها. هناك حاجة ملحة لحل المشاكل الصحية المتعلقة بالتخلص غير السليم من النفايات في جميع أنحاء البلاد. في جميع المدن بما في ذلك العاصمة طرابلس يتم التخلص من النفايات البلدية عن طريق نقلها الى إلى مكبات مفتوحة غير صحية حيث يتم حرق النفايات في الهواء مما يزيد من خطر التلوث. نتيجة لذلك كل سنة تزداد المساحات المطلوبة لهذه المدافن والمكبات مما تسبب في زيادة التلوث البصري والصحي بشكل كبير وزاد الضغط على البلديات نتيجة لعدم وجود مساحات إضافية لهذه المدافن من ناحية وعدم قدرتها على فتح مدافن جديدة مناسبة من حيث بعدها عن المراكز السكانية وقبولها من قبل المجتمعات المحلية من جهة أخرى. فمن الواضح أن نظام إدارة النفايات الصلبة في معظم مناطق ليبيا غير مستدام ويواجه تحديات سياسية وجغرافية وبيئية مهمة. لذلك، هناك حاجة ملحة للتحقيق في تقنيات إدارة النفايات الصلبة الجديدة مثل توليد الطاقة من النفايات. في السنوات القليلة الماضية، عملت الهيئة العامة للبيئة في ليبيا على وضع لوائح وتعليمات لإدارة النفايات، ولكن حتى الآن لا تزال قيد التطوير. هذا يرجع إلى حقيقة أنه لا يوجد سوى القليل من المعلومات المتاحة فيما يتعلق بالتوليد (الكميات والتركيبات) والتعامل مع النفايات والتخلص منها، مما يستلزم تقييم الوضع الحالي وبذل مجهودات أكبر فيما يتعلق بإدارة النفايات ومن ثم معالجتها بالطرق الصحيحة.

4.2 توليد النفايات وإدارتها في منطقة طرابلس

تم إجراء تحليل فني-اقتصادي شامل. حيث تم التركيز على توصيف النفايات الصلبة البلدية، 1) من حيث تكوينها المادي، بما في ذلك جمع البيانات والتحقق منها، 2) تقدير القيمة الحرارة للنفايات باستخدام بيانات التحليل الأولي التي تم الحصول عليها في المشورات العلمية، 3) حساب التدفق المستقبلي لتوليد النفايات الصلبة البلدية. تم إجراء حساب مقدار الطاقة القابلة للاسترداد لإنتاج الكهرباء والحرارة، وإجراء تحليل اقتصادي لتقدير التكلفة الصافية لحرق الطاقة، مع الأخذ في الاعتبار تكاليف الاستثمار والتشغيل والصيانة، وكذلك الإيرادات من مبيعات الكهرباء على التوالي. يتوافق الجزء الأخير مع التحليل البيئي، الذي يتمحور حول ميزة استخدام الأراضي. تمت مقارنة الممارسة الفعلية لاستخدام الأرض لمدافن النفايات مع الأرض المقدرة التي ستكون ضرورية إذا تم تركيب محطة حرق في طرابلس لمعالجة نفس الكمية من النفايات الصلبة المحلية.

توصـيف النفايـات هـو تقنيـة تسـتخدم لتحديـد "طـابع" أو تركيبـة المـواد الموجودة في تيار النفايات. يعد الوصف المفصل للنفايات الصلبة ضروريًا

جدول رقم (1): خصائص تقنيات تحويل النفايات الى طاقة

التقنية		الوصف	الميزات	العيوب
الطرق الحرارية - الكيمائية	طرق الحرق	❖ **تقنية الحرق يمكن تصنيفها الى 3 أنواع:** • حرق النفايات فقط: يتم فيه حرق النفايات عند درجة حرارة أعلى من 1000 درجة مئوية، • أو عن طريق الحرق المشترك مع الفحم والكتل الحيوية، • أو عن طريق استخدام أجزاء من النفايات المعالجة مسبقًا ذات المحتوى الحراري العالي • في كل الحالات يتم إنتاج الحرارة أو الكهرباء أو كليهما.	• يمكن أن تشتمل المدخلات على نفايات كاملة أو نفايات مع إزالة المواد القابلة لإعادة التدوير • يقلل حجم النفايات بنسبة 90%. • تسمح أحدث الأنظمة بالتحكم في انبعاثات ملوثات الهواء لتتوافق مع معايير الانبعاثات • لا يتطلب مساحة كبيرة من الأرض	• تنتج كميات من الغازات الدفيئة • غير مجدي اقتصاديًا للقدرات الصغيرة، أي الأقل من 100 طن من النفايات يوميًا • يتطلب نفايات بقيمة عالية من القيمة الحرارية • تكلفة رأسمالية عالية نسبيا.
	التغويز الحراري	❖ **تقنية التغويز يمكن تصنيفها الى 3 أنواع:** • التغويز الحراري التقليدي ويتم عند درجة حرارة تصل الى 750 درجة مئوية. • أو يتم معالجتها عن طريق ما يسمى بتقنيات البلازما، حيث يتم تمرير النفايات في الفرن عند درجات حرارة عالية تتراوح بين 4000 – 7000 درجة مئوية. • في الحالتين يتم إنتاج غاز الهيدروجين، والميثان وغازات صناعية أخرى	• بسرعة • تسبب القليل من تلوث الهواء • يمكن أن يقلل حجم النفايات بنسبة 50٪ -90٪ • يمكن استخدام غاز التوليف لتوليد الكهرباء أو إنتاج الوقود والمواد الكيميائية وتركيب الغاز الطبيعي	• عملية معقدة • يتطلب إزالة المواد القابلة لإعادة التدوير والنفايات غير العضوية • ضعف استعادة الطاقة المرتبط بالنفايات ذات المحتوى العالي من الرطوبة • يعتبر تنظيف غاز التوليف أمرًا صعبًا بالنسبة للنباتات الكبيرة
	الانحلال الحراري	• الانحلال الحراري والذي يتم عادة عند ضغط عالي ودرجة حرارة تتراوح بين 300-800 درجة مئوية وفي بدون وجود أكسجين، حيث يتم إنتاج الفحم وغازات صناعية ووقود حيوي (زيت سائل).	• يتيح الانحلال الحراري الاستعمال المباشر للمنتجات.	• يحتاج الى ضغوط ودرجات حرارة عالية
طرق الكيمياء الحيوية	التخمر اللاهوائي	• الهضم اللاهوائي :عملية التحويل التي تقوم بها الكائنات الحية الدقيقة (البكتيريا) في غياب الأكسجين. يسفر عن هذه العملية توليد غاز الميثان.	• أقل تعقيدًا من الطرق الأخرى ومجدي اقتصاديا ويمكن التحكم في ملوثات الهواء • مناسبة لأكثر من 2 طن من النفايات يوميًا	• يتطلب النفايات العضوية فقط، لذا وجب فصل النفايات أولا. • يجب معالجة الغاز الحيوي قبل الاستخدام.
	مكبات نفايات مع تجميع للغاز	• تجميع غاز الميثان من مكبات النفايات: يتم التقاط غاز الميثان الناتج من المكبات نتيجة للتحلل الطبيعي للنفايات.	• الخيار الأرخص • ليست عملية معقدة • يمكن استخدام الغاز المنتج لتوليد الطاقة أو مباشرة لإنتاج الحرارة	• كفاءة توليد طاقة منخفضة ويتطلب مساحة كبيرة • يحدث التلوث بسبب الجريان السطحي أثناء المطر • يمكن إطلاق السوائل في المياه الجوفية • يمكن أن تحدث انفجارات بسبب تراكم غاز الميثان
	طرق التخمير	❖ **ينقسم هذا النوع من المعالجة الى:** • التخمير الضوئي والذي تتم فيه معالجة النفايات العضوية بالبكتيريا في وجود مصادر الضوء، • أو التخمير الغير ضوئي والذي تتم فيه معالجة المخلفات العضوية بالبكتيريا بدون وجود الضوء. • في كلا الحالتين يتم إنتاج وقود الإيثانول والهيدروجين وقود الديزل الحيوي.	• من المهم إنتاج الإيثانول، أو الوقود الحيوي، من محاصيل غير غذائية. • إنتاج الإيثانول الحيوي، الذي له أهمية كبيرة في قطاع النقل لأنه وقود نظيف • مطلوب طاقة أقل للتخمير لأنه يعمل في درجات حرارة منخفضة 35-40 درجة مئوية.	• التخمير هو عملية مستمرة ومتقطعة ذات إنتاج بطيء جدًا. • الإيثانول الناتج عن التخمير غير نقي ويتطلب المزيد من العلاج للتنقية، وبالتالي هناك حاجة إلى تكلفة إضافية.
	خلايا الوقود الميكروبية	• خلايا الوقود الميكروبية: في هذا النوع من التقنية يتم تحفيز تفاعل الكائنات الحية الدقيقة والبكتيريا لتحويل محتوى الطاقة الكيميائية إلى مواد عضوية ومن ثم إنتاج الطاقة الكهربائية.	• هذه التقنية مناسبة لتوليد الكهرباء على نطاق صغير في المناطق النائية واستخدام البطاريات التقليدية باهظ الثمن.	• تعتبر هذه التكنولوجيا لا تزال في مهدها وتواجه تحديات عملية مثل انخفاض كثافة الطاقة، وغير اقتصادية حاليا.
الطرق الكيميائية	تحويل النفايات الى وقود	• الأستر :وهي تفاعل حمض وكحول لتكوين مادة الاستر ومن ثم يتم إنتاج وقود الإيثانول ووقود الديزل الحيوي	• من المهم إنتاج الإيثانول، أو الوقود الحيوي، من النفايات بدل المحاصيل الغذائية.	• ستعتمد تكلفة عملية الأستر على المواد الخام المُستعملة في العملية.

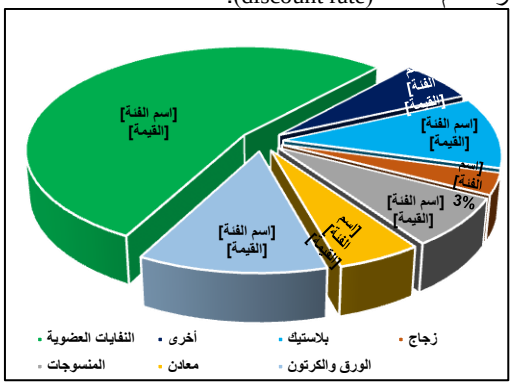
بشكل خاص لنجاح أنظمة إدارة النفايات الصلبة المتكاملة. فالطريقة الأكثر دقة لوصف تركيبة النفايات تتكون من جمع النفايات من المصدر وتصنيف العينة إلى أنواع من المواد. أجريت عدد من الدراسات في هذا الصدد لتعريف مكونات النفايات الصلبة في ليبيا إلى ثلاث مجموعات: (1) جميع النفايات المنزلية وما شابهها من المنازل ؛ (2) النفايات الصناعية ، بما في ذلك تلك الناتجة عن الأنشطة الصناعية والتجارية ، والمواد القابلة للاشتعال الخاصة، وهياكل السيارات، ونفايات اعمال البناء والتشييد؛ (3) نفايات الصرف الصحي بما في ذلك نفايات المزارع والمستشفيات والعيادات والصيدليات والمختبرات، [19]. تشير طبيعة النفايات المتولدة في ليبيا إلى بعض الاختلاف خلال الفصول. قدر تقرير البنك الدولي الصادر سنة 2018 [1] الأحجام السنوية لإنتاج النفايات في ليبيا في عام 2016 بنحو 2,147,596 طن للنفايات البلدية الصلبة. في دراسة لتوصيف النفايات وتحديد مكوناتها والتي أجراها عدد من الباحثين سنة 2016 [20]، بلغ متوسط إنتاج للفرد اليومي من النفايات البلدية الصلبة 0.74 كجم للفرد، وأن 36.6% من النفايات البلدية عبارة عن مواد عضوية. يوضح الجدول (2) مكونات النفايات الصلبة البلدية لمدينة طرابلس الليبية. تم حساب مكونات النفايات البلدية بهذا الجدول من عدد من الدراسات التي تم إجرائها في السنوات الماضية [20]، [19]، [1]. أظهرت مقارنة نتائج هذه الدراسات انه هناك تباين بنسب كل نوع من النفايات. لذلك في هذه الدراسة تم اعتماد حساب نسبة كل نوع من النفايات الصلبة البلدية لمدينة طرابلس وذلك بأخذ المتوسط الحسابي لهذه النسب. نتيجة لذلك فان المكونات الرئيسية للنفايات الصلبة البلدية في طرابلس كما يلي: النفايات العضوية (53.9%)، الورق (12%)، البلاستيك (11%)، زجاج (3.3%)، المنسوجات (7.6%)، المعادن (5.4%)، النفايات أخرى (6.4) (الشكل رقم 2). يوضح الجدول (2) نوعية النفايات البلدية لمدينة طرابلس والقيمة الحرارية لكل نوع من النفايات (القيم بناءً على المرجع [2]).

4.3 التحليل الاقتصادي لتقنيات تحويل النفايات إلى طاقة

ستتناول الورقة بالتحليل الأداء الفني والمؤشرات الاقتصادية لمحطة توليد الطاقة الكهربائية من النفايات، حيث استهدفت الدراسة الفنية تحديد كمية الطاقة الكهربائية المنتجة خلال عمر المشروع، بينما التحليل الاقتصادي استهدف حساب تكلفة إنتاج وحدة الطاقة الكهربائية وتقديرات الإيرادات المتوقعة والعائد من الاستثمار.

اعتمدت الورقة على البيانات الأساسية اللازمة لاستكمال التحليلات الفنية والمالية من المنشورات العالمية في هذا المجال لتكوّن مع البيانات

المدرجة ببعض العروض المقدمة للجهات المختصة بالدولة ما تم تسميته بالحالة المرجعية. كما تمت دراسة حساسية تأثير كلُّ عامل من عوامل التكلفة الرئيسية على النتائج بما يساعد على فهم المخرجات الفنية والمالية للمحطة المقترحة من ناحية ومعرفة المتغيرات الفنية والمالية الحرجة (ذات التأثير الكبير على الاستثمار) من ناحية أخرى. سيتم من خلال البرنامج المعد في هذه الدراسة تحليل التدفقات المالية السنوية (مصروفات ودخل) وتحديد وحساب تكلفة إنتاج وحدة الطاقة (دولار/كيلووات ساعة) وفترة استرداد رأس المال ومعدل العائد الداخلي وصافي القيمة الحاضرة عند أسعار خصم مختلفة (discount rate).



الشكل رقم 2: مكونات النفايات الصلبة البلدية في منطقة طرابلس

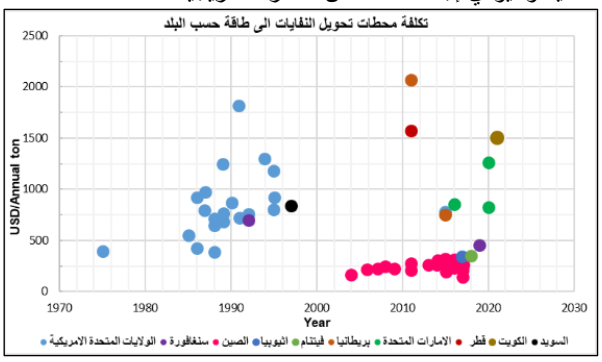
جدول رقم (2): مكونات والقيمة الحرارية للنفايات الصلبة لبلدية طرابلس

مكون النفايات الصلبة البلدية	نسبة كل نوع من النفايات	متوسط القيم الحرارية ميجا جول/كجم	القيمة الحرارية لخليط النفايات الصلبة - ميجا جول/كجم
النفايات العضوية	53.93%	4.77	2.57
الورق والكرتون	12.08%	17.33	2.09
بلاستيك	11.03%	35.67	3.93
زجاج	3.30%	0.00	0.00
المنسوجات	7.65%	19.53	1.49
معدن	5.45%	0.00	0.00
نفايات أخرى	6.45%	6.50	0.42
المجموع			**10.51**

تهدف الدراسة إلى وضع مبادئ وإرشادات مساعدة للاستثمار في مجال تحويل النفايات الى طاقة وذلك عن طريق دراسة أداء محطة حرارية تعمل بتقنية الحرق لتوليد الطاقة الكهربائية من النفايات بقدرة 335000 طن في السنة أي ما يكافئ 100 ميجاوات حرارة. سيتم دراسة الجدوى الاقتصادية للمشروع وذلك عن طريق دراسة إمكانيات توليد الطاقة الكهربائية من النفايات بمنطقة طرابلس. ويعتبر تحديد موقع المحطة وسعتها عاملان أساسيان لجدوى المشروع.

4.3.1 *التكاليف*

على مدى عقود، تطورت تقنيات تحويل النفايات إلى طاقة إلى عمليات معقدة لتأمين معالجة النفايات من جهة والحد من التأثير على البيئة وتوفير الطاقة المتجددة والنظيفة في نفس الوقت من جهة أخرى [21]. تتأثر تكلفة التقنيات المختلفة بإنتاجيتها السنوية، وعدد خطوط الإنتاج، ونظام استرجاع الطاقة المستخدم، ومنظومة تنظيف الغاز العادم. غالبًا ما يكون هناك مفاضلة بين أقصى كفاءة للطاقة وأقل تأثير سلبي للمحطة على البيئة. تم نشر العديد من نماذج التكلفة بنوعيها المتعلقة بتحويل النفايات إلى طاقة في عدد من المنشورات العلمية [22]، [23]، [15]، [18]، [24]، [2]، [25]، [26]، [1]. تكاليف الاستثمار والتشغيل هما المكونان الرئيسيان اللذان يحددان تطوير المحطات الحرارية لتوليد الطاقة من النفايات. فتكاليف الاستثمار تشير إلى التكاليف المتعلقة بتخطيط المشروع وتنميته، بما في ذلك تحديد الموقع ودراسات الجدوى والاستشارات والتصميم والأرض والمعدات والبناء والبنية التحتية (الجدول رقم 3 و4) [18]. بينما تشمل تكاليف التشغيل تكاليف العمالة والوقود والطاقة والصيانة والتحكم في الانبعاثات ورصدها وتحصيل الإيرادات والاتصال العام والإدارة والتنظيم والتخلص الآمن من المخلفات والمواد الكيميائية المساعدة المستخدمة في تشغيل المحطة بطريقة محافظة للبيئة (الجدول رقم 5). يتم تحديد التكاليف التشغيلية بالأخذ في الاعتبار التنبؤ بالأسعار لجميع عناصر التشغيل عن طريق المقارنة مع تجارب المشاريع الحقيقية فيما يخص تكاليف الصيانة والأمن والتأمين وما إلى ذلك[21] . تتطلب المحطة الحرارية لتحويل النفايات إلى طاقة تكاليف استثمار وتشغيل كبيرة والتي تكون في المتوسط أعلى بكثير من طرق معالجة النفايات الأخرى. يوضح الجدول 3 التكلفة الإجمالية المقدرة للنفايات لكل طن لطرق معالجة النفايات المختلفة. تكون التكلفة الإجمالية للمحطات الحرارية لتحويل النفايات إلى طاقة أعلى بشكل عام في البلدان المتقدمة عنها في البلدان النامية. فعلى الرغم من أن تكاليف المعدات لمحطات تحويل النفايات إلى طاقة الحرارية هي نفسها تقريبًا في جميع أنحاء العالم، فإن تكاليف الهندسة والبناء والأرض والعمالة تختلف اختلافًا كبيرًا بين البلدان ذات مستويات الدخل المختلفة. لذلك من الصعب مقارنة تكاليف محطات تحويل النفايات إلى طاقة الحرارية في بلدان مختلفة بسبب اختلافات التكلفة الناتجة عن الظروف المحلية المختلفة. يوضح الشكل رقم 3 تكلفة بناء العديد من محطات تحويل النفايات الى طاقة بتقنية الحرق في البلدان المتقدمة والنامية. تعتبر التكلفة الرأسمالية للمصانع في البلدان المتقدمة أعلى بسبب ارتفاع تكاليف العمالة ومعايير البناء والتحكم في الانبعاثات الأكثر صرامة [27]. عند النظر إلى بيانات تكلفة رأس المال بالشكل رقم 3، من المثير للاهتمام أيضًا ملاحظة أن منشآت تحويل النفايات إلى طاقة في الصين أرخص بكثير من معظم البلدان الأخرى. حيث يبلغ متوسط تكلفة رأس المال لـ 60 مشروعًا صينيًا من محطات تحويل النفايات الى طاقة 250 دولارًا أمريكيًا لكل طن سنوي للطن (تتراوح بين 143-320 دولارًا للطن السنوي). للمقارنة فإن متوسط تكلفة رأس المال الأولي لـــ 21 محطة بالولايات المتحدة الأمريكية هي 840 دولارًا لكل طن سنوي للطن (مدى تراوح الأسعار بين 386-1811 دولارًا) [27]. هذا التباين الكبير في بناء هذه المحطات سيزيد من القدرة التنافسية وسيؤدي إجمالا لانخفاض أسعارها تدريجيا.



الشكل رقم (3): تكلفة بناء محطات تحويل النفايات الى طاقة حول العالم [27].

بمقارنة بتقنيات تحويل النفايات إلى طاقة عن طريق الحرق مع التقنيات الأخرى المستخدمة لمعالجة النفايات الصلبة، نجد أنها تتطلب استثمارات عالية وتكاليف تشغيلية أكثر من التقنيات الأخرى وذلك للميزات الكبيرة بها وتعتبر أكثر التقنيات نضجا في العالم اليوم. بشكل عام يمكن تلخيص النقاط التالية:

- تختلف التكاليف حسب المنشأة وفقًا لتقنية الاحتراق المختارة نظرًا لأن لكل منها خصائص تصميم فريدة، وتغيرات في تكاليف المعدات، والقدرة، وخصائص النفايات الخاصة بالموقع، والمساحة المطلوبة والمتطلبات التنظيمية.
- تتراوح التكاليف الرأسمالية لمحطات توليد الطاقة من النفايات بالحرق من 190-1000 دولار أمريكي للطن السنوي لسعة المحطة، بينما تتراوح تكاليف التشغيل من 12-55 دولارًا أمريكيًا للطن. هذا يجعل الحرق أكثر تكلفة بشكل عام من دفن النفايات في المكبات الصحية او تحويل المواد العضوية الى سماد او من تقنية التحلل اللاهوائي، ولكنه أرخص من تقنية الانحلال الحراري وتقنية التغويز.
- يمكن تعويض التكاليف المرتفعة لمحطات توليد الطاقة من النفايات بالحرق بشكل كبير من خلال الإيرادات المكتسبة من العمليات، طالما يتم تشغيل المرافق بكامل طاقتها التجهيزية وتحسينها من الناحية الفنية.
- هناك وفورات حجم محتملة كبيرة للحرق، خاصة عندما يتم احتساب تكلفة المعدات المتقدمة لمكافحة تلوث الهواء (Advanced air

.Pollution Control (APC) Equipment) ومن ثم، إذا كان هناك طلب كاف على معالجة النفايات أو إذا كان المصنع يمكن أن يخدم منطقة بأكملها، فقد تكون هناك فائدة مالية واضحة [23].

1. تكاليف رأس المال السنوية

في هذه الدراسة تم احتساب تكاليف رأس المال السنوية بناءً على الاستثمارات الأولية للمشروع، ومعدل الفائدة المطلوب لمثل هذا الاستثمار والعمر المتوقع للمحطة. حيث تم اختيار معدل فائدة سنوي يساوي 5% بينما احتساب الجدوى الاقتصادية والفنية للمشروع على مدى 25 سنة وهو العمر الافتراضي للمشروع. عادة هذا النوع من المحطات يصل العمر الافتراضي لها الى 40 سنة، ولكن تم اجراء الحسابات على أساس 25 سنة حتى تكون الجدوى الاقتصادية مبنية على أساس الحد الأدنى للجدوى. تم إجراء تحليل تفصيلي لتكاليف الاستثمار لمحطة تحويل النفايات الى طاقة بسعة 1000 طن في اليوم أي بسعة 100 ميجاوات كقدرة حرارية تقع بمدينة طرابلس لمعالجة 335 ألف طن من النفايات المتولدة سنويا. تم في هذا التحليل حساب إنتاجية المحطة لمدة سنة كاملة. تم اقتراح سعر نوعي لرأس المال قدره 500 دولار لكل طن سنوي من النفايات مشتملا على تكلفة المحطة والمعدات والتركيبات، وهو ما يجعل التكلفة الكلية الاستثمارية للمحطة بـ 167.5 مليون دولار. تم اقتراح هذا السعر بنا ء على مسح موسع للتقارير الدولية الصادرة من هيئات ومنظمات دولية مختصة في إجراء الدراسات المالية والاقتصادية لمشروعات تحويل النفايات الى طاقة ذات السعات المماثلة للسعة المقترحة (الجدول رقم 3) لمحطة توليد الطاقة المقترحة لهذا المشروع [23]،[15]،[18]،[2]،[27]،[1]، وبعض العروض المقدمة للجهات المختصة من شركات متخصصة في بناء هذا النوع من المحطات. تبين من هذا المسح أن تكلفة رأس المال لهذا النوع من المحطات يتراوح بين 400 الى 600 دولار لكل طن بالسنة للبلدان متوسطة الدخل [23]، [2]، كما هو الحال في ليبيا.

الجدول رقم 3 : تكاليف الاستثمار في تحويل النفايات إلى طاقة باستخدام تقنية الحرق [2]، [23].

الوصف	تكاليف الاستثمار (دولار الأمريكي/سعة المحطة السنوية بالطن)	الخصائص
البلدان المنخفضة الدخل	500 - 300	• تكاليف العمالة المنخفضة • قيمة منخفضة للقيمة الحرارية للنفايات • الحاجة منخفضة لحماية المعدات
البلدان المتوسطة الدخل	600 - 400	• وجود متطلبات الحماية للمحطات • قيمة أعلى للقيمة الحرارية للنفايات • ارتفاع تكلفة العمالة
البلدان ذات الدخل المرتفع (أوربا والولايات المتحدة الأمريكية)	900 - 600	• متطلبات صارمة على المعدات والسلامة

يتم في بعض الأحيان احتساب التكاليف أحيانًا أيضًا استنادًا إلى سعة كل كيلووات من سعة محطة القدرة الكهربائية للمحطة. الجدول رقم 4 يوضح مقارنة تكاليف رأس المال للأنواع المختلفة لتقنيات محطات تحويل النفايات الى طاقة باستخدام المعالجة الحرارية (دولار/كيلووات).

الجدول رقم 4 : تكاليف الاستثمار في تحويل النفايات إلى طاقة باستخدام تقنية الحرق [2]، [23].

الوصف	تكاليف الاستثمار (دولار الأمريكي/ كيلووات من سعة المحطة)
حرق مع استعادة الطاقة	10000 - 7000
تغويز (تقليدي)	11000 - 7500
التغويز (قوس البلازما)	11500 - 8000
الانحلال الحراري	11500 - 8000

في هذه الدراسة تم إجراء تحليل التكلفة والفائدة لبناء منشأة لتحويل النفايات إلى طاقة بحيث سيتم تمويل مشروع تحويل النفايات إلى طاقة في العاصمة طرابلس على أساس أن نسبة الدين الى رأس المال المملوك هي 30/70%، أي أن 70% (Debit) من مقدار رأس المال سيتم اقتراضه من المؤسسات المالية بنسبة فائدة 5% ولمدة 15 سنة والنسبة المتبقية وهي و30% (Equity) سيقوم بتوفيرها المستثمر أو المستثمرين ومطوري المشروع. يلخص الجدول رقم 5 مدخلات النمذجة المالية لهذا المشروع.

جدول رقم 5: المعايير الفنية والاقتصادية لمشروع توليد الطاقة الكهربائية من حرق النفايات بمدينة طرابلس

المتغير	مدى تغير القيمة عالميا	القيمة المستخدمة في الدراسة
كمية النفايات المعالجة	600-1500 طن/يوم	1000 طن/يوم
كمية النفايات المعالجة السنوية	-	335000 طن/سنويا
تكاليف الأستثمار	400-600 دولار/طن سنوي - للطن	500 دولار/طن سنوي - للطن
نسبة الدين/رأس المال المملوك	50-70%	70% (نسبة الدين)
*سعر فائدة القرض السنوي	5-6%	5%
فترة قرض	10-20 سنة	15 سنة
*تكاليف تشغيل الوحدة	25 دولار/طن	25 دولار/طن
*تعريفة التغذية	90-110 دولار/كيلووات ساعة	110 دولار/كيلووات ساعة
رسوم الدعم	10-25 دولار/طن	11 دولار/طن
عدد أيام تشغيل المحطة في السنة	300-365 يوم/سنة	335 يوم/سنة
*القيم الحرارية	7000-12000 كيلو جول/كيلوجرام	10 كيلو جول/كيلوجرام
كفاءة المحطة الكهربائية	14-30%	27%
عمر المحطة	25-30 سنة	25 سنة
فترة الإنشاء	سنتين	سنتين

*تم إجراء تعديل طفيف على أساس الظروف الفعلية.

2. تكاليف التشغيل السنوية

تشمل التكاليف التشغيلية لمحطات تحويل النفايات الى طاقة بشكل أساسي تكاليف العمالة والمواد المساعدة (مثل المواد الكيميائية لمعالجة غاز المداخن) وقطع الغيار والصيانة والتأمين والضرائب والكهرباء وتكاليف التخلص من المخلفات مثل الخبث أو الرماد المتطاير (في بعض الحالات يمكن استخدام الخبث في بناء الطرق)، بينما مصدر الوقود الرئيسي لهذه المحطات هو النفايات الصلبة البلدية والتي عادة ما يتم الحصول عليها دون تكاليف. يجب أيضًا مراعاة التكاليف الإضافية المحتملة لمعالجة النفايات الإضافية (مثل فصل اجزء النفايات غير المرغوب فيها مثل المواد الخاملة). الجدول رقم 6 يبين توزع التكاليف المختلفة لمحطات توليد الطاقة بالحرق [18]. يجب ملاحظة أن تكاليف التشغيل المحددة لكل طن من النفايات تنخفض مع زيادة طاقة المصنع ومعدل الاستخدام، وتعتمد كذلك بشدة على عمر المحطة. على سبيل المثال، تصل تكاليف التشغيل لمحطة توليد الطاقة من المخلفات ذات عمر افتراضي 40 عامًا بها الى حوالي 85% من إجمالي التكلفة في أوروبا بينما تمثل التكاليف التشغيلية لنفس نوع المحطة حوالي 50% من التكاليف الكلية في البلدان النامية وذلك بسبب انخفاض تكاليف العمالة وتكلفة الأراضي. تم دراسة التكاليف التشغيلية لمحطات تحويل النفايات الى طاقة باستخدام تقنية الحرق في عدد من الدراسات والورقات البحثية [28]، [29]، [18]، حيث تتراوح بين 16 دولارا و 32 دولارا لكل طن من النفايات الصلبة البلدية المعالجة. في هذه الدراسة تم تحديد تكاليف التشغيل بـ 25 دولار/طن سنويا للمحطة، أي بتكلفة سنوية مقدارها 8.4 مليون دولار تدفع سنويا لفترة 25 سنة وهو العمر الافتراضي للمحطة.

الجدول رقم 6: توزع التكاليف المختلفة لمحطات توليد الطاقة بالحرق [18].

أنواع التكاليف		الوصف	النسبة
تكاليف الاستثمار		المعدات والأجهزة	%70
		تكاليف البناء	%30
		استخدام الأراضي والتكاليف الأخرى	
		مصروفات التمويل	
		فوائد القروض	
		إدارة المخاطر	
تكاليف التشغيل		تكاليف الإهلاك والصيانة	%38
		رواتب الموظفين	%14
		المواد أولية	%48
		استهلاك طاقة المحطة	
		مصاريف بيئية	
		مصاريف مالية	
		نفقات إضافية	

5. الإيرادات المتوقعة من تحويلات النفايات إلى طاقة

في هذه الدراسة تم الأخذ في الاعتبار فقط بيع الكهرباء المنتجة من محطة تحويل النفايات الى الكهرباء والرسوم المطلوبة على النفايات او ما يسمى برسوم البوابة كمصدرين رئيسين لعائدات محطة تحويل النفايات إلى طاقة.

- *توليد الكهرباء*

أظهرت التجارب الدولية أنه من أجل أن تكون محطة تحويل النفايات إلى طاقة ذات قدرة عالية فنيا واقتصاديا، يجب ان لا تقل القيمة الحرارية للنفايات البلدية المستخدمة كوقود لهذه المحطة عن 6 ميجا جول/كجم. بالنظر إلى القيمة الحرارية للنفايات الصلبة المتعددة في مدينة طرابلس وهي في المتوسط 10.5 ميجا جول/كجم وهو ما يعادل 2.91 ميجاوات - ساعة من الطاقة الحرارية لكل طن من النفايات البلدية. من المعلوم أن عملية استرجاع الطاقة الحرارية الموجودة في النفايات وتحويلها الى طاقة كهربائية يصاحبها فقد حراري وميكانيكي. استنادًا إلى المنشورات الدولية المختلفة [30]، تم اعتبار الفقد الحراري للغلاية في المتوسط 10%، واستهلاك المحطة نفسها يقدر بـ 15%. وثّقت المؤلفات البحثية كذلك أن كفاءة محطات تحويل النفايات الى طاقة بتقنية الاحتراق العاملة في أماكن مختلفة حول العالم تتراوح بين 25-30% [31]. في هذه الدراسة تم اعتبار ان كفاءة تحويل الطاقة الحرارية الى طاقة كهربائية لمحطة توليد الطاقة من النفايات تبلغ حوالي 27%، وبالتالي فإن إجمالي الطاقة الكهربائية المولدة والتي يتم توريدها الى الشبكة تقدر بـ 0.61 ميجاوات ساعة لكل طن من النفايات الصلبة. الجدول رقم 7 يوضح ميزان الطاقة والعائدات من النفايات لمحطة الطاقة المقترحة بمدينة طرابلس. من هذا الجدول نجد أن إجمالي الدخل من بيع الطاقة الكهربائية لهذه المحطة سيكون 22,126,500 دولار في السنة. يجب ملاحظة أنه لم يتم احتساب الإيرادات الأخرى، مثل بيع المعادن وبيع الرماد المتبقي السفلي (يستعمل في تعبيد الطرق وصناعة مواد البناء).

- *رسوم البوابة (رسم الدعم)*

رسوم البوابة أو رسوم دعم المحطة: هو المبلغ الذي تكسبه مكبات النفايات أو محطات الطاقة لكل طن من النفايات الموردة للمحطة من الحكومة المحلية أو تعرف كذلك عادة انها الرسوم المفروضة على ناقلات النفايات أو البلدية لكل طن من النفايات التي يتم جلبها إلى المنشأة وتعتبر مصدر دخل رئيسي أيضا في منشأة الحرق الى جانب مصدر الدخل الأخر وهو بيع الطاقة الكهربائية المتولدة من المحطة [23]، [32]. رسوم البوابة المستخدمة في هذه الدراسة هي 11 دولار/للطن. إجمالي الدخل من دعم النفايات من محطة تحويل النفايات الى طاقة سيكون 3,685,000 دولار سنويا كما هو موضح في الجدول رقم 7.

جدول رقم 7: ميزان الطاقة والعائدات من النفايات لمحطة الطاقة المقترحة

الطاقة المدخلة (ميجاوات ساعة/طن من النفايات)		الطاقة المفقودة أو المستهلكة (ميجاوات / طن من النفايات)		الطاقة المتبقية (ميجاوات/طن من النفايات)		الطاقة المتبقية (ميجاوات ساعة/سنة)		عوائد بيع الكهرباء ورسوم الدعم الحكومي بالمليون دولار	
كمية الطاقة في النفايات	2.92	فقد الحرارة في الأفران والرماد والغازات من المدخنة (10٪)	0.29	الطاقة الموردة إلى الشبكة	0.61	استهلاك المحطة من الكهرباء	35615	سعر بيع الكهرباء: 110 دولار/ميجاوات ساعة	**22,126,500**
		خسائر التوربينات (73٪)	1.92			صافي إنتاج الكهرباء	201,150	رسوم الدعم: 11 دولار/ للطن	**3,685,000**
		أستهلاك المحطة (15%)	0.11						
المجموع	2.92	المجموع	2.31	المجموع	0.61	إجمالي إنتاج الكهرباء	236,765	**المجموع**	**25,811,500**

6. الفوائد البيئية

تمتاز منشآت تحويل النفايات إلى طاقة بفوائد بيئية عديدة مقارنة بالطرق الأخرى المستخدمة في معالجة وإدارة النفايات الصلبة وخاصة مدافن النفايات الصحية المزودة بمنظومة تجميع الغاز، كما هو موضح أدناه:

- تعتبر عملية تحويل النفايات الى طاقة النفايات مصدر متجدد للطاقة: تتكون النفايات الصلبة عادة من أكثر من 50% من المواد الحيوية، المشتقة من العمليات البيولوجية. فوزارة الطاقة الامريكية تعرّف عملية حرق الجزء الحيوي من النفايات الصلبة في عملية تحويل النفايات إلى طاقة بأنه مصدر طاقة متجدد. وبالمثل، المجلس الأوروبي يعتبر عمليات احتراق الكتلة الحيوية مصدرًا للطاقة المتجددة ويعرف الكتلة الحيوية على أنها تتضمن الجزء القابل للتحلل من النفايات الصلبة.
- يقلل من انبعاث الغازات المسببة للاحتباس الحراري: على الرغم من أن عمليات توليد الطاقة من محطات تحويل النفايات إلى طاقة ينتج عنها انبعاث غاز ثاني أكسيد الكربون وهو غاز الدفيئة الأساسي المتراكم في الغلاف الجوي، إلا أن هذا الجزء المنبعث من ثاني أكسيد الكربون يعتبر جزءًا من دورة الكربون الطبيعية للأرض. فمن المعروف أن النباتات والأشجار التي تشكل الورق ومخلفات الطعام (أي النفايات الحيوية) تمتص وبالتالي تزيل ثاني أكسيد الكربون من الجو أثناء نموها، ويتم إرجاع ثاني أكسيد الكربون الحيوي هذا إلى الغلاف الجوي عند حرق هذه المواد. على النقيض من ذلك، عندما يتم حرق الوقود الأحفوري لإنتاج الطاقة، فإنه يطلق ثاني أكسيد الكربون الأحفوري الذي لم يكن جزءًا من دورة الكربون في الأرض لفترة طويلة (أي ضمن النطاق الزمني للإنسان).
- يقلل من استخدام الوقود الأحفوري لإنتاج الكهرباء: إن عملية حرق كل طن من النفايات الصلبة في محطات توليد الطاقة من النفايات لإنتاج الطاقة الكهربائية يجنب استهلاك حوالي برميل واحد من النفط (أو كمية معادلة من الغاز الطبيعي) لإنتاج الكهرباء. يمكن أن يؤدي احتراق النفايات في مرافق الطاقة إلى القضاء على الآثار البيئية المرتبطة بأنواع الوقود الأحفوري التقليدية الأخرى غير المتجددة. لا ينتج الوقود الأحفوري مثل الفحم والنفط والغاز الطبيعي انبعاثات ثاني أكسيد الكربون وثاني أكسيد الكبريت وأكاسيد النيتروجين أثناء الاحتراق فحسب، بل ينبعث منه أيضًا غاز الميثان، أحد اقوى الغازات الدفيئة، أثناء عمليات التعدين والنقل والاحتراق.

- تنتج طاقة نظيفة وموثوقة: تقنيات تحويل النفايات إلى طاقة متقدمة وتؤدي إلى انبعاثات محدودة. خلصت وكالة حماية البيئة الأمريكية [33] إلى أن محطات تحويل النفايات الطاقة الحديثة تنتج الطاقة الكهربائية مع تأثير أقل على البيئة من أي مصدر آخر تقريبًا. علاوة على ذلك، يمكن أن تكون محطات انتاج الطاقة من النفايات قريبة من المناطق الحضرية حيث تكون هناك حاجة ماسة إلى الطاقة. في هذه المواقع، يتم توليد مخزون الوقود للمنشأة - النفايات الصلبة - بشكل موثوق من قبل سكان المناطق الحضرية.
- عمليات إعادة التدوير: في محطات تحويل النفايات الى طاقة يمكن استعادة وإعادة تدوير المواد الحديدية والمعادن الأخرى كنواتج بعد عملية حرق النفايات والتي تنتهي في قاع المحرقة مع الرماد. هذا يقلل من الاعتماد المستقبلي على عمليات التعدين.
- يقلل من الاعتماد على مدافن النفايات: فعملية حرق النفايات في محطات توليد الطاقة من النفايات يقلل بشكل كبير من حجم النفايات الى ما نسبته 90%. هذا بدوره يقلل من مساحات الأراضي المطلوبة للمكبات والمدافن الصحية. بالإضافة الى ذلك تنتج مدافن النفايات
- أداء متفوق على مدافن النفايات الصحية: كما ذكر سابقا فان محطات تحويل النفايات الى طاقة تقلل من انبعاث الغازات الدفيئة، وذلك من خلال تجنب انبعاثات غاز الميثان بشكل رئيسي في مدافن النفايات الصحية. وذلك لأن منشآت تحويل النفايات إلى طاقة تستعيد الطاقة من النفايات بشكل أكثر كفاءة من مكب النفايات المجهز باسترداد غازات المدافن الصحية. يتم إنتاج غاز الميثان في مدافن النفايات عندما تتحلل النفايات المدفونة. يمكن تجميع غاز الميثان عن طريق منظومة لتجميع الطاقة. تشير البيانات من هذه الأنظمة إلى أن معدلات تجميع غاز الميثان تختلف اختلافًا كبيرًا بناءً على التصميم والظروف المحلية. ونتيجة لذلك، تنبعث نسبة كبيرة من غاز الميثان المنتج في صورة غازات الدفيئة. فعلى سبيل المثال تنتج محطة تحويل النفايات إلى طاقة بقدرة 100 ميجاوات 38 طنًا من ثاني أكسيد الكربون في الساعة، أي 6.7 مليون طن على مدى 20 عامًا من ثاني أكسيد الكربون. في نفس الوقت تنتج محطة بسعة 100 ميجاوات تستخدم غاز الميثان المنتج من مدافن النفايات الصحية وبنفس كمية النفايات حوالي 28.7 مليون طن من ثاني أكسيد الكربون. نستنتج من ذلك أن محطات تحويل النفايات الى طاقة بالحرق أكثر كفاءة بأربع مرات من مدافن النفايات في إدارة انبعاثات غاز الميثان المنبعث من النفايات الصلبة [11].

7. النتائج والمناقشة

عقب تحديد المعطيات المذكورة أعلاه، تم إعداد برنامج يتم من خلاله تحليل التدفقات المالية السنوية (مصروفات ودخل) وتحديد المؤشرات المالية والاقتصادية التالية:

- تكلفة إنتاج وحدة الطاقة (دولار/ ميجاوات ساعة).
- فترة استرداد رأس المال.
- معدل العائد الداخلي على أساس التسعيرة المقترحة.
- صافي القيمة الحاضرة.

سيتم تقديم النتائج الخاصة بالحالة المرجعية أولاً، ثم يتم تحليل حساسية عدد من العوامل المؤثرة في النتائج والمتمثلة في التكلفة النوعية للمشروع (مليون دولار/ ميجاوات)، تكلفة إنتاج وحدة الطاقة (دولار/ميجاوات ساعة)، التكاليف السنوية، سعر بيع وحدة الطاقة (دولار/ميجاوات ساعة)، والعمر الافتراضي للمشروع. باستخدام هذه المدخلات في نموذج مالي تم حساب صافي القيمة الحاضرة ومعدل العائد الداخلي وفترة استرداد رأس المال والحد الأدنى لنسبة تغطية خدمة الدين في الجدول رقم 5.

1. *الحالة المرجعية:*

مدخلات الحالة المرجعية موضحةٌ في الجدول رقم (5). يبين الجدول رقم (8) نتائج التحليل المالي والاقتصادي الخاص بها:

بالرجوع الى المؤشرات الاقتصادية المختلفة والمتمثلة في صافي القيمة الحاضرة ومعدل العائد الداخلي وفترة استرداد المال نجد أن مشروع تحويل النفايات إلى طاقة له فوائد اقتصادية وربحية جيدة، حيث أن نتائج الجدوى الاقتصادية بالجدول رقم 8 توضح بكل تأكيد مدى جدوى المشروع، فمعدل العائد الداخلي بلغ 13.2% (الذى يعكس تكلفة الفرصة البديلة للاستثمار ومن ثم فالأمر يقتضى أن يكون معدل العائد الداخلي أكبر من سعر الفائدة في السوق)، وان المشروع يمكنه أن يسترد كل التكاليف الثابتة في حدود 10 (فترة استرداد راس المال في حدود 10 سنوات) وأن صافي القيمة الحاضرة للمشروع تصل الى حوالي 79 مليون دولار. صافي القيمة الحاضرة هي إحدى الأدوات التي تستخدم لتقييم المشروعات الاستثمارية (وخاصة مشروعات طويلة الأجل)؛ تعتمد طريقة عمل صافي القيمة الحاضرة على التأكد من أن المشروع محل التقييم يحقق تدفقات نقدية تزيد عن القيمة المستثمرة في المشروع. الجدول رقم 9 يبين التدفقات النقدية للمشروع، بينما الجدول رقم 10 يبين الأرباح والخسائر لمشروع حرق النفايات.

جدول رقم 8: المؤشرات الاقتصادية الأساسية للحالة المرجعية

الوصف	طرابلس
تكلفة رأس المال (بالمليون دولار):	167.5
قيمة الدين (بالمليون دولار) (Debt):	117.25
رأس المال المملوك (بالمليون دولار) (Equity):	50.25
الطاقة السنوية المنتجة (ميجاوات ساعة):	201,150
نسبة استخدام (%):	91.8%
تكلفة إنتاج وحدة الطاقة (دولار/ميجاوات ساعة):	100.7
سعر بيع وحدة الطاقة (دولار/ميجاوات ساعة):	110
صافي القيمة الحاضرة (NPV) (بالمليون دولار):	78.26
معامل العائد الداخلي (IRR) (%):	13.2
فترة استرداد رأس المال (بالسنة):	9.6
الحد الأدنى لنسبة تغطية خدمة الدين (min DSCR):	1.3
الحد الأقصى لنسبة تغطية خدمة الدين (max DSCR):	2.1

يحتوي هذا المشروع على هامش ربح صاف مستقر وعائد استثمار مرتفع. في السنة الأولى من التشغيل، بلغ هامش صافي الربح 18.9%. في وقت لاحق، حافظ هامش الربح الصافي على نمو مستدام حتى السنة السادسة عشرة. وأخيرًا، حافظ هامش الربح الصافي على 41.6%. ففي خلال فترة عمر المشروع بأكملها كما مبين بالجدول رقم 10.

جدول رقم 9: بيان التدفقات النقدية لمشروع حرق النفايات (مليون دولار).

السنة	فترة الإنشاء		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
التدفقات النقدية	0	0	25.81	25.81	25.81	25.81	25.81	25.81	25.81	25.81	25.81	25.81	25.81
الاستثمار	25.13	25.13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
سداد أصل القرض	0	0	7.82	7.82	7.82	7.82	7.82	7.82	7.82	7.82	7.82	7.82	7.82
مصروفات فوائد القرض	0	0	5.86	5.47	5.08	4.69	4.30	3.91	3.52	3.13	2.74	2.35	1.95
التكاليف	0	0	8.38	8.38	8.38	8.38	8.38	8.38	8.38	8.38	8.38	8.38	8.38
صافي التدفق النقدي	-25.13	-25.13	3.75	4.53	4.92	5.31	5.7	6.09	6.48	6.87	7.26	7.66	8.05
التدفق النقدي التراكمي	-25.13	-50.26	-46.51	-41.98	-37.06	-31.75	-26.05	-19.96	-13.48	-6.61	0.65	8.31	16.36

السنة	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
التدفقات النقدية	25.81	25.81	25.81	25.81	25.81	25.81	25.81	25.81	25.81	25.81	25.81	25.81	25.81	25.81
الاستثمار	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
سداد أصل القرض	7.82	7.82	7.82	7.82	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
مصروفات فوائد القرض	1.56	1.17	0.78	0.39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
التكاليف	8.38	8.38	8.38	8.38	8.38	8.38	8.38	8.38	8.38	8.38	8.38	8.38	8.38	8.38
صافي التدفق النقدي	8.05	8.44	8.83	9.22	17.43	17.43	17.43	17.43	17.43	17.43	17.43	17.43	17.43	17.43
التدفق النقدي التراكمي	24.41	32.85	41.68	50.9	68.33	85.76	103.19	120.62	138.05	155.48	172.91	190.34	207.77	225.2

2. *تحليل الحساسية*

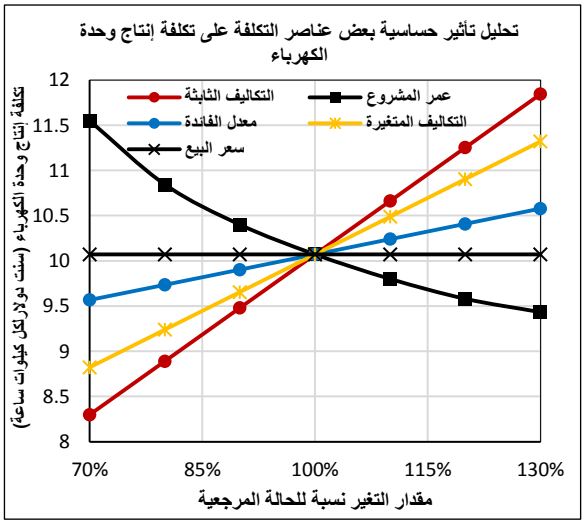
تأسيساً على نتائج الحالة المرجعية، تقدم البنود التالية تحليلاً لحساسية العوامل المؤثرة في الحسابات الاقتصادية على أداء المحطة المقترحة في مدينة طرابلس. في تحليل الحساسية سيتم دراسة تأثير كل من مقدار التغير في عناصر التكاليف وهي تكاليف رأس المال وتكاليف التشغيل والصيانة ومعدّل الفائدة وسعر بيع وحدة الطاقة وعمر المشروع كنسبة من الحالة المرجعية مع كل من معدّل العائد الداخلي (IRR) وتكلفة إنتاج وحدة الكهرباء وصافي القيمة الحاضرة.

- تأثير قيمة رأس المال:

يعتبر السعر النوعي (بالدولار/للطن) أهم عوامل التكلفة المؤثرة في جدوى المشروع من الناحية الاقتصادية. يشهد مجال إنتاج محارق إنتاج الطاقة تغيّر كبير في تكلفة المعدات وبالتالي رأس المال المطلوب. بناء على ما سبق عرضه في الشكل رقم 3، نجد أن تكلفة رأس المال تتغير حسب الدول التي يتم تركيب بها المحطات نتيجة للطيف الواسع في أسعار محطات تحويل النفايات الى طاقة، حيث اقل الأسعار يمكن ملاحظتها في الصين والدول الأقل دخلا، بينما ترتفع أسعار المحطات في اوروبا والولايات المتحدة الامريكية. بتثبيت كافة عناصر التكلفة الأخرى الواردة بالحالة المرجعية أعلاه، وتغيير تكلفة رأس المال الخاصة بتوريد وتركيب المحطة، وذلك بتغيير التكلفة النوعية بالزيادة والنقصان من قيمة التكلفة المرجعية (من 30% الى 130% من الحالة المرجعية) أخذاً في الاعتبار:

- فرضيات أقل لبيان القيمة التي قد يصبح عندها المشروع ذو جدوى اقتصادية من حيث تحقيق ربح معّبر عنه بقيمة إيجابية لفترة استرداد رأس المال ومعدل العائد الداخلي وصافي القيمة الحاضرة.
- فرضيات أكبر تتماشى مع التكلفة الحالية في السوق العالمي وتحسباً لأية تغيرات غير متوقعة قد تطرأ عليه.

الشكل رقم 4 يبين تغير تكلفة وحدة الطاقة المنتجة بالسنت دولار لكل كيلووات ساعة لموقع المشروع بطرابلس نتيجة لتغير تكاليف رأس المال. يتضح من الشكل بأنّه حتى مع زيادة تكاليف رأس المال بنسبة 30% فان تكلفة وحدة الطاقة المنتجة تصل الى 11.8 سنت دولار لكل كيلووات ساعة. أي ان الجدوى الاقتصادية للمشروع تتحقق حتى لتكاليف رأس المال تصل لـــ 218 مليون دولار، وتكون قيمة معدل العائد الداخلي في حدود 7.2% (مع ملاحظة أنّ الحسابات تمت بمعدّل للفائدة يساوي 5%). غير أنّه عند تخفيض تكاليف رأس المال بنسبة 30% من القيمة المرجعية فإنّ ذلك يؤدي الى انخفاض تكلفة وحدة الطاقة المنتجة الى 8.3 سنت دولار لكل كيلووات ساعة وزيادة معدّل العائد الداخلي الى 26%. وفي نفس الوقت وبالرجوع الى الشكل رقم 6 نجد أن صافي القيمة الحاضرة ترتفع من 78 مليون دولار للحالة المرجعية الى 129 مليون دولار عندما تنخفض التكاليف الثابتة بمقدار 30%.



الشكل رقم (4): تحليل تأثير حساسية بعض عناصر التكلفة على تكلفة انتاج وحدة الكهرباء

- *تأثير قيمة التكاليف السنوية*

يتطلب تشغيل وصيانة المشروع نفقات سنوية مستمرة طوال عمره الافتراضي، وهي تتمثل في تكلفة التشغيل والصيانة، بما في ذلك أجور العاملين بالمحطة ومكافآت أيّة مساندة فنية خارجية وقطع الغيار وغيرها من التكاليف المتغيرة.

جدول رقم 10: بيان الأرباح والخسائر لمشروع حرق النفايات (مليون دولار).

السنة	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
الإيرادات	25.81	25.81	25.81	25.81	25.81	25.81	25.81	25.81	25.81	25.81	25.81	25.81	25.81
التكاليف	8.38	8.38	8.38	8.38	8.38	8.38	8.38	8.38	8.38	8.38	8.38	8.38	8.38
الاهلاك	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7
انفقات المالية	5.86	5.47	5.08	4.69	4.30	3.91	3.52	3.13	2.74	2.35	1.95	1.56	1.17
الربح قبل احتساب الربح	4.87	5.26	5.65	6.04	6.43	6.82	7.21	7.6	7.99	8.38	8.78	9.17	9.56
ضريبة الدخل	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
صافي الربح	4.87	5.26	5.65	6.04	6.43	6.82	7.21	7.6	7.99	8.38	8.78	9.17	9.56
هامش صافي الربح	18.9%	20.4%	21.9%	23.4%	24.9%	26.4%	27.9%	29.4%	31.0%	32.5%	34.0%	35.5%	37.0%

السنة	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
الإيرادات	25.81	25.81	25.81	25.81	25.81	25.81	25.81	25.81	25.81	25.81	25.81	25.81
التكاليف	8.38	8.38	8.38	8.38	8.38	8.38	8.38	8.38	8.38	8.38	8.38	8.38
الاهلاك	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7
انفقات المالية	0.78	0.39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
الربح قبل احتساب الربح	9.95	10.34	10.73	10.73	10.73	10.73	10.73	10.73	10.73	10.73	10.73	10.73
ضريبة الدخل	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
صافي الربح	9.95	10.34	10.73	10.73	10.73	10.73	10.73	10.73	10.73	10.73	10.73	10.73
هامش صافي الربح	38.6%	40.1%	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%	41.6%

وقد تم تقدير التكلفة السنوية المرجعية بقيمة 8.4 مليون دولار سنوياً. وبتثبيت كافة عناصر التكلفة الواردة بالحالة المرجعية أعلاه، وتغيير التكاليف السنوية (تشغيل وصيانة) بالزيادة والنقصان من قيمة التكلفة المرجعية (من 30% الى نسبة 130% من الحالة المرجعية) أخذاً في الاعتبار:

- فرضيات أقل لبيان القيمة التي قد يصبح عندها المشروع ذو جدوى اقتصادية من حيث تحقيق ربح معبر عنه بقيمة إيجابية لفترة استرداد رأس المال ومعدل العائد الداخلي.
- فرضيات أكبر تتماشى مع احتمالية ارتفاعها فعلياً بسبب الظروف الراهنة بالبلاد.

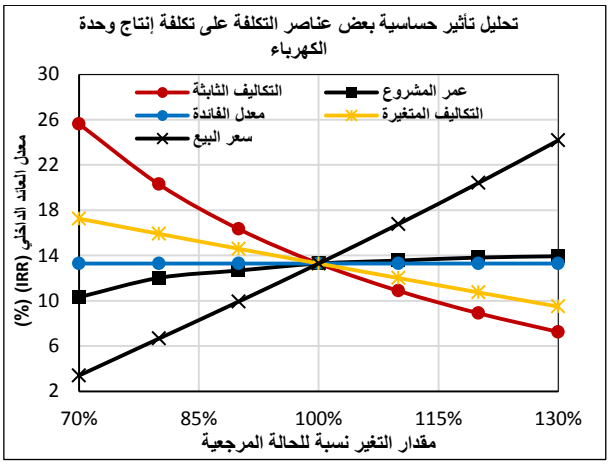
يتضح من الشكل رقم 4 و5 و6 أنه عند تخفيض التكلفة السنوية إلى 30% من القيمة المرجعية فإنّ ذلك يؤدي الى انخفاض تكلفة وحدة الطاقة المنتجة الى 8.8 سنت دولار لكل كيلووات ساعة وزيادة معدّل العائد الداخلي بنسبة 31% وصافي القيمة الحاضرة بنسبة 44% من الحالة المرجعية. وبالعكس من ذلك وحتى مع زيادة تكاليف التشغيل والصيانة بنسبة 30% في الشكل رقم 4، فان تكلفة وحدة الطاقة المنتجة تصل الى 11.3 سنت دولار لكل كيلووات ساعة. نلاحظ ان تأثير تغير التكاليف الثابتة والتكاليف السنوية على تكلفة وحدة الطاقة المنتجة ومعامل العائد الداخلي وصافي القيمة الحاضرة متقارب وذلك لان التكاليف السنوية تمثل حوالي 50% من كل التكاليف على طول العمر الافتراضي للمشروع.

- تأثير قيمة معامل الفائدة

لبيان حساسية معامل الفائدة على تكلفة إنتاج وحدة الكهرباء المنتجة وعلى المؤشرات الاقتصادية الأخرى، تم اقتراح عدة نسب للفائدة تتراوح من 30% الى نسبة 130% من الحالة المرجعية مع تثبيت باقي عناصر التكلفة الواردة بالحالة المرجعية أعلاه. يتضح من الشكل رقم 5 بأنّه لا يوجد أي تأثير لتغير نسب الفائدة على معدّل العائد الداخلي. غير أنه عند زيادة نسب الفائدة إلى 30% من القيمة المرجعية فإنّ ذلك يؤدي الى زيادة تكلفة إنتاج وحدة الكهرباء بنسبة لا تتجاوز 5% وانخفاض صافي القيمة الحاضرة بنسبة 29% من الحالة المرجعية.

- تأثير تغيير سعر بيع وحدة الطاقة

في سبيل دراسة حساسية النتائج للتغير في تكلفة شراء وحدة الطاقة تم اقتراح عدة أسعار بيع تتراوح من 30% الى نسبة 130% من الحالة المرجعية مع تثبيت باقي عناصر التكلفة الواردة بالحالة المرجعية أعلاه. بيّنت تحليلات الحساسية أنّ تغيير سعر بيع وحدة الطاقة بالزيادة والنقصان يؤثر بشكل كبير جدا على صافي القيمة الحاضرة ومعدل العائد الداخلي. فعند خفض سعر بيع الطاقة الكهربائية من 110 دولار/للميجاوات ساعة الى 77 دولار/للميجاوات ساعة أي بنسبة 30% فإن صافي القيمة الحاضرة للمشروع كما هو موضح بالشكل رقم 6 تكون أقل من الصفر وبالتالي من الواضح جدا ان المشروع غير مجدي وان سعر البيع معامل حساس جدا وحرج في هذا التحليل.

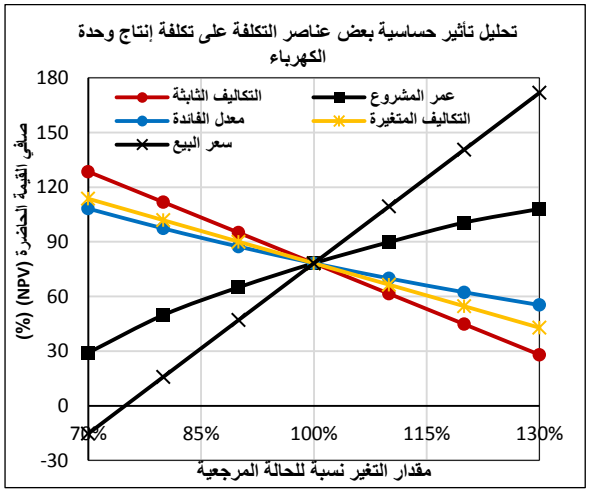


الشكل رقم (5): تحليل تأثير حساسية بعض عناصر التكلفة على معدل العائد الداخلي

- تأثير تغير العمر الافتراضي للمشروع:

بالنظر الى الأشكال رقم 4 و5 و6 نجد أن تغير عمر المشروع بالزيادة والنقصان عامل مهم جدا لكل المؤشرات الاقتصادية تحت الدراسة من تكلفة إنتاج وحدة الطاقة وسعر بيعها وصولا الى معدل العائد الداخلي وصافي القيمة الحاضرة. نستنتج من ذلك أن عمر

المشروع له تأثير كبير المؤشرات الاقتصادية للمشروع. حيث يلاحظ أن قصر عمر المشروع له تأثير أكبر من زيادته وذلك بسبب تركز تكاليف المشروع في تكاليف رأس المال والتي تكون مستحقة في بداية عمر المشروع.



الشكل رقم (6): تحليل تأثير حساسية بعض عناصر التكلفة على صافي القيمة الحاضرة

8. الخلاصة والتوصيات

تعتبر إدارة النفايات واحدة من المشاكل الرئيسية في العالم الحديث، وهي قضية دولية تتفاقم بسبب حجم وتعقيد النفايات المنزلية والصناعية التي يتخلص منها المجتمع. لسوء الحظ، كانت العديد من الممارسات التي تم اعتمادها في الماضي تهدف إلى حلول قصيرة المدى دون مراعاة أو معرفة كافية للآثار طويلة المدى على الصحة أو البيئة أو الاستدامة، وهذا يؤدي في كثير من الحالات إلى الحاجة إلى اتخاذ إجراءات علاجية صعبة ومكلفة.

أصبح النمو السريع الحالي في توليد النفايات الصلبة البلدية في المنطقة العربية بسبب النمو السكاني وزيادة التنمية الاقتصادية في البلدان النامية من أخطر القضايا البيئية. في عام 2016، ارتفع إجمالي كمية النفايات الصلبة البلدية في المنطقة العربية حوالي 107 مليون طن. تختلف كفاءة جمع النفايات في الدول العربية بشكل كبي جدا، ولكن في المتوسط حوالي 50% من النفايات لا يتم جمعها. يتم رمي حوالي 93% من النفايات في المكبات المفتوحة ودون معالجة حقيقية. في السنوات الأخيرة زاد الاهتمام بمعالجة النفايات وادارتها بطريقة صحيحة في عدد من الدول العربية، وبعض منها أنشأت عدد من محطات لتحويل النفايات الى طاقة. حيث يواجه قطاع ظ النفايات لصناعة الطاقة آفاق جيدة في السوق. استنادًا إلى التكنولوجيا الناضجة والتكاليف التشغيلية المنخفضة، يمكن أن يتوقع قطاع النفايات إلى طاقة هوامش ذات صلة وأرباحًا مستقرة.

تتناول هذه المقالة إدارة النفايات البلدية وإمكانات تحويل النفايات إلى طاقة في المنطقة العربية. على الصعيد العالمي، تولد المنطقة العربية المزيد من النفايات للفرد مقارنة ببلدان ذات نفس مستوى الدخل في العالم. علاوة على ذلك، ازداد إجمالي كمية النفايات الناتجة باطراد على مر السنين، ومن المتوقع أن يستمر في الارتفاع بعد النمو الاقتصادي والسكاني الكبيرين لعدد كبير من الدول العربية. تتمثل الاستراتيجية الرئيسية لإدارة النفايات في لعدد من الدول بالمنطقة العربية حاليًا في الحد من النفايات وإعادة استخدامها وإعادة تدويرها، في حين أن معظم النفايات غير القابلة لإعادة الاستخدام وغير القابلة لإعادة التدوير تنتهي في مدافن النفايات. تتوفر تقنيات بديلة مختلفة لمعالجة النفايات بطريقة أكثر استدامة. تم استكشاف خيارات تحويل النفايات إلى طاقة في هذه الدراسة من أجل التنفيذ المستقبلي المحتمل في المنطقة العربية. هذا الخيار جذاب لأنه صديق للبيئة ويمكن أن يقلل من اعتماد الدولة على الوقود الأحفوري. وفقًا للحسابات التي أجريت في هذه الدراسة، كانت إمكانات الطاقة المولدة من النفايات في دول جامعة الدول العربية أكثر من 1133 بيتا جول (1133 PJ) سنويا.

تستعرض هذه الورقة الوضع العالمي لتقنيات تحويل النفايات إلى طاقة كوسيلة لإنتاج الطاقة المتجددة وطريقة التخلص من النفايات الصلبة البلدية. تمت مناقشة أربع تقنيات ومقارنتها: الحرق، التحلل اللاهوائي، التغويز والتحلل الحراري. وكانت الجوانب موضع التركيز هي تلوث الهواء، والتكلفة، والمنتجات الجانبية، والقدرة على معالجة النفايات، والنضج التجاري، وكفاءة الطاقة، ونوع النفايات المعالجة. نتيجة لأن تقنية الحرق ناضجة للغاية وقادرة على معالجة أي نوع من النفايات بشكل فعال، فإن الحرق هو الخيار الأكثر جاذبية. وبالتالي، أن هذا الخيار يجب أن يسير جنباً إلى جنب مع استراتيجية وطنية فعالة للحد من النفايات وإعادة استخدامها وإعادة تدويرها في الدول العربية.

في الوقت الحاضر، تكتسب تقنيات تحويل النفايات إلى طاقة زخمًا كبيرا كوسيلة ملائمة لإدارة النفايات. تظهر الدراسة اتجاها متزايدا عالميا نحو إنتاج الطاقة المتجددة من النفايات باستخدام التقنيات المختلفة لتحويل النفايات الى طاقة. تؤكد نتائج هذا العمل، بما يتماشى مع النتائج الأخرى في المنشورات العالمية، أن محطات تحويل النفايات الى طاقة عن طريق الحرق هو تقنية بديلة معقولة ومستدامة لمعالجة النفايات دون المساومة على المحافظة على البيئة. كذلك يمكن أن نستنتج أنه عند التخطيط لإدارة النفايات الصلبة البلدية يجب على صانعي القرار أن يأخذوا بعين الاعتبار بدائل تحويل النفايات الى طاقة وفقًا للجوانب الاقتصادية والتقنية والتشريعية والبيئية. تم في هذه الدراسة مراجعة التقنيات المختلفة لتحويل النفايات الى طاقة والتي تتم من خلال مجموعة متنوعة من العمليات مثل الاحتراق والتحلل الحراري والتحويل إلى غازات والتحلل اللاهوائي. تعتبر تقنية الحرق هي الأكثر نضجا حاليا في العالم وخاصة للنفايات الأقل رطوبة.

الجزء الثاني من الورقة يتناول تقييم فرص الاستثمار لبناء محطة جديدة لتحويل النفايات الى طاقة في مدينة طرابلس. في الجزء، تم إجراء تحليل موسع للجدوى الفنية والاقتصادية لمحطة توليد الكهرباء باستخدام النفايات البلدية عن طريق تقنية الحرق الواسعة الانتشار. تم إجراء تحليل فني-اقتصادي تفصيلي لأداء المحطة المقترحة على أساس الظروف الخاصة بمدينة طرابلس باستخدام برمجية متخصصة SAM صادرة عن المعامل الوطنية للطاقات المتجددة الأمريكية NREL [34] وقد تم في هذا التحليل حساب إنتاجية المحطة طوال سنة كاملة. من الناحية الاقتصادية، سيكون تنفيذ محطة جديدة للنفايات في طرابلس استثمارًا جيدًا. قُدر الاستثمار الرأسمالي للمحطة بسعة 1000 طن/ يوم بـ 167.5 مليون دولار (500 دولار للطن من الطاقة السنوية بنسبة استخدام 92%). ومن هذا المبلغ، سيتم تقديم 117.25 مليون دولار أمريكي عن طريق قرض من البنوك بفائدة 5% و50.25 مليون دولار أمريكي من الاستثمار الخاص. سيم دفع رسوم بوابة مقدارها 11 دولار امريكيا لكل طن بمحطة توليد الطاقة من عمليات معالجة النفايات الصلبة البلدية من قبل السلطات المحلية، وسيتم بيع الطاقة الكهربائية المولدة بسعر 110 دولار أمريكي لكل ميغاوات. تم تحديد عمر افتراضي للمحطة بـ 25 سنة. تظهر نتائج التحليل المالي والاقتصادي ربحية جيدة لمشروع تحويل النفايات إلى طاقة مع معدل عائد داخلي يبلغ 13.2% وفترة استرداد رأس المال قدرها 10 سنوات. كما أن صافي القيمة الحاضرة للاستثمار وهامش الربح تصل الى حوالي 79 مليون دولار، 41.6% على التوالي. يتمتع المشروع بقدرة قوية على مقاومة مخاطر الظروف المتغيرة. حيث تم إجراء تحليل لحساسية العوامل المؤثرة في الحسابات الاقتصادية على أداء المحطة المقترحة لمدينة طرابلس. في تحليل الحساسية تم دراسة تأثير التغير في تكاليف رأس المال وتكاليف التشغيل والصيانة ومعدّل الفائدة وسعر بيع وحدة الطاقة وعمر المشروع كنسبة من الحالة المرجعية مع كل من معدّل العائد الداخلي وتكلفة إنتاج وحدة الكهرباء وصافي القيمة الحاضرة. بينت نتائج تحليل الحساسية أن لكل من قيمة رأس المال وتغيير سعر بيع وحدة الطاقة وتغير العمر الافتراضي تأثير كبير على المؤشرات الاقتصادية مثل معامل العائد الداخلي وصافي القيمة الحاضرة، بينما أظهرت نتائج التحليل تأثير أقل لكل من قيمة التكاليف السنوية وقيمة معامل الفائدة.

المراجع

[1] A. Silpa Kaza, Lfisa Yao, Perinaz Bhada-Tata and F. Van Woerden, *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. World Bank, 2018.

[2] J. M. V. A. E. C. K. C. G. J. C. M. P. P. J. P. B. Samal Bex, "World Energy Resources 2016," *World Energy Counc. 2016*, pp. 6–46, 2016, [Online]. Available: https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2016/10/World-Energy-Resources_SummaryReport_2016.10.03.pdf.

[3] W. A. Qazi and M. F. M. Abushammala, "WASTE-TO-ENERGY TECHNOLOGIES : A LITERATURE REVIEW," pp. 387–409, 2018.

[4] S. Calixto, "Pre-Feasibility Study of a Waste-To-Energy Plant in Santiago, Chile Executive Summary," 2017, [Online]. Available: http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/Selva Calixto Jan 2017.pdf.

[5] S. Alzate, B. Restrepo-Cuestas, and Á. Jaramillo-Duque, "Municipal solid waste as a source of electric power generation in Colombia: A techno-economic evaluation under different scenarios," Resources, vol. 8, no. 1, pp. 1–16, 2019, doi: 10.3390/resources8010051.

[6] Z. Shareefdeen, N. Youssef, A. Taha, and C. Masoud, "Comments on waste to energy technologies in the United Arab Emirates," pp. 0–1, 2020.

[7] J. F. Perrot and A. Subiantoro, "Municipal waste management strategy review and waste-to-energy potentials in New Zealand," Sustain., vol. 10, no. 9, 2018, doi: 10.3390/su10093114.

[8] EU, "Integrated Pollution Prevention and Control - Reference Document on Best Available Techniques for Large Combustion Plants," Integr. Pollut. Prev. Control, no. July, pp. 1–618, 2006.

[9] T. G. Dieter Mutz, Dirk Hengevoss, Christoph Hugi, "Waste-to-Energy Options in Municipal Solid Waste Management-A Guide for Decision Makers in Developing and Emerging Countries," Dtsch. Gesellschaft für Int. Zusammenarbeit GmbH, no. May, pp. 1–58, 2017, doi: 10.1136/hrt.2009.187062.

[10] CEMBUREAU, "Activity Report cembureau, The European Cement Association, Brussel," 2015.

[11] G. Consultants and S. W. Services, "Development of a Waste-to-Energy Project for the Municipality of Anchorage , Alaska White Paper Report (Draft): Development of a Waste-to-Energy Project," no. September, 2019.

[12] U. Di Matteo, B. Nastasi, A. Albo, and D. Astiaso Garcia, "Energy contribution of OFMSW (Organic Fraction of Municipal Solid Waste) to energy-environmental sustainability in urban areas at small scale," Energies, vol. 10, no. 2, 2017, doi: 10.3390/en10020229.

[13] UNFCCC, "United Nation Framework Convention on Climate Change," online, 2016. available: https://cdm.unfccc.int/Projects/projsearch.html.

[14] G. C. Young, Municipal solid waste to energy conversion processes: economic, technical and renewable comparisons. John Wiley & Sons, Inc, 2010.

[15] C. S. Psomopoulos and N. J. Themelis, "A guidebook for sustainable waste management in Latin America," Proc. Int. Resour. Recover. Congr. Waste-to-Energy, Vienna, Austria, no. September, pp. 8–9, 2014, doi: 10.13140/2.1.2305.4724.

[16] T. H. F. Seksan Udomsri, Andrew R. Martin, "Economic assessment and energy model scenarios of municipal solid waste incineration and gas turbine hybrid dual-fueled cycles in Thailand," Waste Manag., vol. 30, no. 7, pp. 1414–1422, 2010.

[17] F. J. C. Pirotta, E. C. Ferreira, and C. A. Bernardo, "Energy recovery and impact on land use of Maltese municipal solid waste incineration," Energy, vol. 49, no. 1, pp. 1–11, 2013, doi: 10.1016/j.energy.2012.10.049.

[18] X. gang Zhao, G. wu Jiang, A. Li, and L. Wang, "Economic analysis of waste-to-energy industry in China," Waste Manag., vol. 48, pp. 604–618, 2016, doi: 10.1016/j.wasman.2015.10.014.

[19] A. Ali and C. Ezeah, "Framework for Management of Post-Conflict Waste in Libya," Eur. Sci. Journal, ESJ, vol. 13, no. 5, p. 32, 2017, doi: 10.19044/esj.2017.v13n5p32.

[20] W. A. S. Moftah, D. Marković, O. A. S. Moftah, and L. Nesseef, "Characterization of Household Solid Waste and Management in Tripoli City—Libya," Open J. Ecol., vol. 06, no. 07, pp. 435–442, 2016, doi: 10.4236/oje.2016.67041.

[21] R. Šomplák, T. Ferdan, M. Pavlas, and P. Popela, "Waste-to-energy facility planning under uncertain circumstances," Appl. Therm. Eng., vol. 61, no. 1, pp. 106–114, 2013, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2013.04.003.

[22] M. G. S. Consonni, M. Giugliano, "Alternative strategies for energy recovery from municipal solid waste, part B: emission and cost estimates," *Waste Manag.*, vol. 25, pp. 137–148, 2005.

[23] S. Kaza and P. Bhada-Tata, "Decision Maker's Guides for Solid Waste Management Technologies," *Decis. Maker's Guid. Solid Waste Manag. Technol.*, 2018, doi: 10.1596/31694.

[24] M. K. Hill, *Solid waste*. 2012.

[25] D. Mutz and C. J. Hugi, "Waste-to-Energy Options in - Municipal Solid Waste Management A Guide for Decision Makers in Developing -," no. May, pp. 2015–2017, 2017.

[26] V. Á. Araya, "Should the Chilean Government Encourage Waste-to-Energy Facilities for Municipal Solid Waste ?," 2019.

[27] J. S. Wu, "Capital Cost Comparison of Waste-to-Energy (WTE), Facilities in China and the U.S.," 2018, [Online]. Available: http://gwcouncil.org/wp-content/uploads/2018/07/Jane-Wu_thesis.pdf.

[28] Y. Cheng, H., Hu, "Curbing dioxin emissions from municipal solid waste incineration in China: Re-thinking about management policies and practices," Environ. Pollut., vol. 158, no. 9, pp. 2809–2814, 2010.

[29] Y. Cheng, H., Hu, "Municipal solid waste (MSW) as a renewable source of energy: current and future practices in China.," Bioresour. Technol., vol. 101, no. 11, pp. 3816–3824, 2010.

[30] Q. Huang, Y. Chi, and N. J. Themelis, "A rapidly emerging WTE technology: Circulating fluid bed combustion," Air Waste Manag. Assoc. - Int. Conf. Therm. Treat. Technol. Hazard. Waste Combustors 2013, no. October, pp. 18–29, 2013.

[31] O. K. M. Ouda, S. A. Raza, R. Al-Waked, J. F. Al-Asad, and A. S. Nizami, "Waste-to-energy potential in the Western Province of Saudi Arabia," J. King Saud Univ. - Eng. Sci., vol. 29, no. 3, pp. 212–220, 2017, doi: 10.1016/j.jksues.2015.02.002.

[32] T. V. P. S. De Jaeger, J. Eyckmans, N. Rogge, "Wasteful waste-reducing policies? The impact of waste reduction policy instruments on collection and processing costs of municipal solid waste.," Waste Manag., vol. 31, no. 7, pp. 1429–1440, 2011.

[33] "EPA (2016). Energy Recovery from the Combustion of Municipal Solid Waste. Available at: https://www.epa.gov/smm/energy-recovery-combustion-municipal-solid-wastemsw," 2016.

[34] W. M. J. and P. Gilman, "22--Technical manual for the SAM physical trough model." NREL/TP-5500-51825, p. June, pp. 275–3000, 2011.