خارطة الطريق لتطوير محطات تحويل النفايات إلى طاقة في المنطقة العربية

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 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

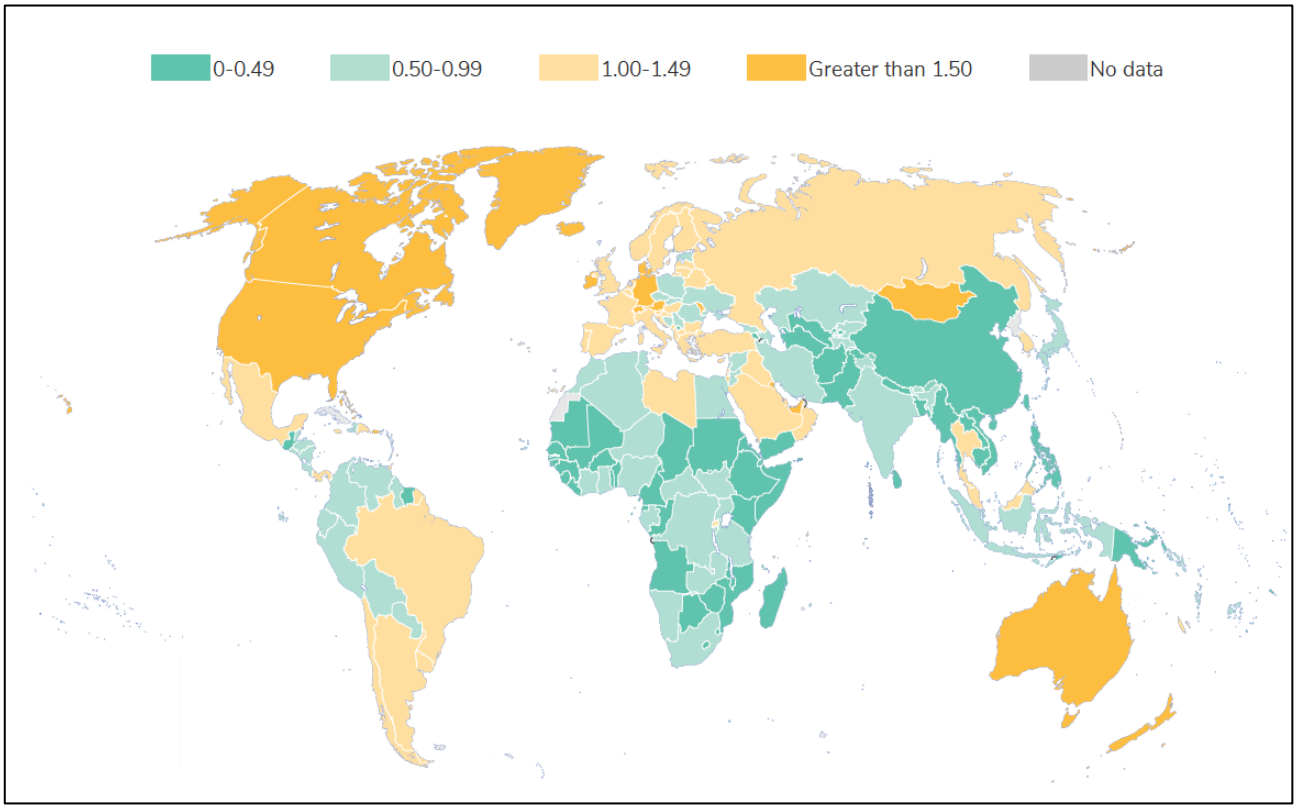
صناعة هذا القطاع، تقدم هذه الورقة تحليلاً اقتصاديًا شاملاً ومفصلاً لمحطات تحويل النفايات الى طاقة. تؤخذ في الاعتبار طرق التمويل المختلفة لهذا النوع من المشاريع وتعرفة التغذية، والإيرادات ورسوم البوابة (دعم التخلص من النفايات)، وتناقش الربحية والقدرة على سداد الديون. أيضا تم إجراء تحليل الحساسية لعدد 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.الوضع الراهن لصناعة تحويل النفايات إلى طاقة في العالم

إنتاج واستخدام الطاقة من حرق النفايات الصلبة هو مفهوم يمارس في أوروبا منذ مطلع القرن الماضي. بدافع القلق من تلوث المياه الجوفية والبيئة وندرة الأرض لدفن النفايات، شرعت العديد من البلدان الأوروبية واليابان في برامج بناء ضخمة لبرامج تحويل النفايات الى طاقة منذ ستينيات القرن الماضي. تعد أوروبا أكبر سوق وأكثرها تطورا لتقنيات تحويل النفايات الى طاقة، حيث استحوذت على 47.6% من إجمالي عائدات السوق في عام 2013. تهيمن اليابان على سوق آسيا والمحيط الهادئ، والتي تستخدم ما يصل إلى 60% من نفاياتها الصلبة للحرق. ومع ذلك، فقد شهد أسرع نمو في السوق في الصين، التي زادت من قدرتها على تحويل النفايات الى طاقة في الفترة 2011-2015 بأكثر من الضعف. استنادًا إلى البيانات المتاحة من عام 2018، هناك حوالي 2179 منشأة لتحويل النفايات الى طاقة في جميع أنحاء العالم 2018 كما هو مبين بالجدول رقم (1)، [8]، [9]. تمتلك الدول الآسيوية (اليابان وتايوان وسنغافورة والصين) أكبر عدد من محطات تحويل النفايات الى طاقة، تليها دول أوروبا وأمريكا الشمالية. تواجه العديد من البلدان التي سعت بقوة إلى تحويل النفايات الى طاقة مشاكل مع وجود مساحة مفتوحة محدودة لمواقع مدافن النفايات وكثرة سكان المناطق الحضرية. على سبيل المثال، تدير

اليابان حاليًا حوالي 70% من نفاياتها الصلبة في محطات تحويل النفايات الى طاقة. على الصعيد العالمي هناك حاليًا أكثر من 200 محطة حرارية لتوليد الطاقة من النفايات تحت الإنشاء وسيتم تشغيلها بين عامي 2020 و2023. أغلب هذه المحطات تقع في البلدان النامية في آسيا والمحيط الهادئ بما في ذلك الصين وتايلاند والفلبين وإندونيسيا وميانمار [10]. الشكل رقم (1) يبين نصيب الفرد من النفايات البلدية الصلبة المتولدة في العالم.



الشكل رقم (1): نصيب الفرد من النفايات البلدية الصلبة المتولدة (كيلوغرام / فرد / يوم) [1].

يوجد حاليًا حوالي 500 محطة لتحويل النفايات إلى طاقة تعمل في جميع أنحاء أوروبا، وتعالج أكثر من 96 مليون طن من النفايات سنويًا وهو ما يعادل 20% من النفايات المولدة في دول الاتحاد الأوربي، [11]. تنتج هذه المحطات 30 تيراوات ساعة من الطاقة الكهربائية و55 تيراوات ساعة من الطاقة الحرارية. وهذا يعادل تقريبًا تزويد الاحتياجات السنوية لـ 13 مليون نسمة بالكهرباء و12 مليون نسمة بالحرارة في هذه البلدان. يرجع ذلك أساسًا إلى التشريعات التي تتطلب خفضًا بنسبة 65% في دفن النفايات الصلبة المحلية القابلة للتحلل بحلول عام 2035 مع وجود هدف ملزم لخفض سعة المكبات المتحكم بها إلى حد أقصى يبلغ 10% من النفايات الصلبة المحلية، [11]، [12]. نظرًا لتوجيهات الاتحاد الأوروبي بشأن دفن النفايات، تتراوح تقديرات تشييد منشآت تحويل النفايات الى طاقة الجديدة من 60 إلى 80 مصنعًا جديدًا بحلول عام 2020.

بدأ نقل تقنيات تحويل النفايات الى طاقة إلى أمريكا الشمالية لأول مرة في أواخر الستينيات وأوائل السبعينيات. حيث تم إنشاء العديد من المشاريع خلال فترة السبعينات بعدد من الولايات وبعض هذه المشاريع مازال في العمل إلى الآن. ساعد نجاح هذه المشاريع صناعة تحويل النفايات الى طاقة في الحصول على قبول من قبل قادة الحكومات المحلية، ومؤسسات التمويل. حيث اجتذبت الحوافز الضريبية التي وفرتها الحكومة الفيدرالية لمشاريع تحويل النفايات الى طاقة استثمار رأس المال الخاص في مثل هذه المشاريع للمساعدة في نضوج هذه الصناعة في الولايات المتحدة وأثارت تطور العديد من المشاريع الجديدة. يوجد حاليًا في الولايات المتحدة الامريكية حوالي 84 محطة لتحويل النفايات إلى طاقة الجزء الأكبر منها يستخدم تقنية الحرق. تتم معالجة أكثر من 95 ألف طن من النفايات يوميا بهذه المحطات، أي بقدرة سنوية تصل الى حوالي 30 مليون طن من النفايات سنويا وهو ما يعادل 7% من النفايات المتولدة بالولايات المتحدة. تصل القدرة الاجمالية لمحطات توليد الكهرباء الى 2543 ميجاوات لتوليد الكهرباء، أي بإنتاجية تصل لـــ 14000 ميجاوات ساعة من الطاقة الكهربائية في السنة، بينما تصل قدرة المحطات المزدوجة لتوليد الكهرباء والحرارة الى 2725 ميجاوات [13].

أدت التنمية الاقتصادية والتحضر السريع في الصين على مدى العقود القليلة الماضية إلى توليد سريع للنفايات بحيث وصل الى 200 مليون طن من النفايات الصلبة المحلية في عام 2016. وفقًا للبنك الدولي، تفوقت الصين على الولايات المتحدة كأكبر مولد للنفايات الصلبة المحلية في عام 2004. وقد أنتج ذلك أزمة نفايات غير مسبوقة في العديد من مدنها. بسبب نقص الأراضي لمواصلة دفن النفايات الصلبة، شرعت الصين في برنامج بناء رئيسي لمرافق تحويل النفايات الى طاقة. زادت قدرة المحطات الصينية لتحويل النفايات الى طاقة بشكل مطرد من 14 مليون طن في عام 2007 إلى ما يقرب من 75 مليون طن بحلول عام 2016. في الوقت الحالي، تعد الصين واحدة من أكبر الأسواق لبناء مصانع تحويل النفايات الى طاقة. على الرغم من أن دفن النفايات لا يزال الوسيلة السائدة للتخلص من النفايات في الصين. منذ بداية القرن الحادي والعشرين، أصبحت الصين رابع أكبر منتج للطاقة من النفايات بعد الاتحاد الأوروبي واليابان والولايات المتحدة. تبني الصين في المتوسط 50 منشأة جديدة لتحويل النفايات الى طاقة كل عام. تستخدم أغلب هذه المحطات الجديدة تقنية الحرق الكامل للنفايات. يتم حاليًا تصميم أكبر منشأة في العالم لإنتاج الطاقة الكهربائية من النفايات بسعة إجمالية تبلغ 5600 طن في اليوم وذلك لتوليد الكهرباء اللازمة لمحطة تحلية المياه بسعة 450 الف متر مكعب يوميًا من مياه الشرب، [8].

جدول رقم 1: منشأت تحويل النفايات إلى طاقة في العالم، [14].

الدولة	عدد المحطات	الدولة	عدد المحطات	الدولة	عدد المحطات
الصين	299	فرنسا	126	البرتغال	4
النمسا	11	جزر فارو	2	قطر	1
استراليا	1	المجر	1	روسيا	1
أذربيجان	1	ايرلندا	1	السويد	33
بلجيكا	18	الهند	6	سنغافورة	6
برمودا	1	ايسلندا	1	سلوفاكيا	2
البرازيل	1	ايطاليا	51	سيراليون	1
كندا	6	اليابان	1162	تايلند	1
سويسرا	30	كوريا الجنوبية	50	تركيا	1
المانيا	121	لوكسمبورج	1	تايوان	25
الدنمارك	30	موناكو	1	فيتنام	1
أستونيا	1	مالطا	1	لتوانيا	1
أثيوبيا	1	ماليزيا	1	فنلندا	9
اسبانيا	12	هولندا	13	بولندا	1
إمارة أندورا	1	النرويج	17	المملكة المتحدة	37
جمهورية التشيك	3	الولايات المتحدة	84		

3. إدارة النفايات في المنطقة العربية

تشكل إدارة النفايات الصلبة البلدية واحدة من أهم المشاكل الصحية والبيئية التي تواجه الدول العربية. مع أن الاستفادة من النفايات في عالمنا العربي لا زالت لم تتقدم كثيرًا مقارنة بأوروبا وأمريكا والصين واليابان حيث يوجد أكثر من 900 منشأة لإنتاج الطاقة من النفايات، ولكن عمومًا فإن هناك جهود مميزة في هذا المجال لا بد من الإشارة إليها، كحال المشاريع التي يجري العمل عليها في قطر والامارات والأردن والمغرب وعمان ومصر.

تعتبر إدارة النفايات البلدية الصلبة أحد أخطر وأصعب التحديات التي تواجهها جميع البلدان في المنطقة العربية حيث أدت عوامل عديدة إلى زيادة تراكم النفايات الصلبة في أرجاء المنطقة. ومن هذه العوامل على سبيل المثال ارتفاع معدل النمو السكاني، المدنية، الهجرة، النمو السريع في المجال الصناعي والتوسع الاقتصادي أيضا. مع ذلك، فإن توليد النفايات في المنطقة العربية متواضع نسبيًا مقارنة بالاتجاهات العالمية، ويرجع ذلك أساسًا إلى انخفاض عدد السكان. أنتجت المنطقة العربية عام 2016 حوالي 107 مليون طن من النفايات الصلبة البلدية أي بمتوسط 0.87 كيلوجرام للفرد في اليوم (الشكل رقم 2) [1]. تم إجراء تعديل طفيف وإعادة إنتاج على الشكل

رقم 2 ليشمل الدول الأعضاء بجامعة الدول العربية فقط بدل من دول منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا. من المهم أن نلاحظ أن معدل نصيب الفرد من توليد النفايات الصلبة البلدية في الدول العربية يتراوح بين 0.2 على 1.83 كجم/يوم للشخص الواحد [1]. وتكمن أسباب هذا التباين الواسع بين الدول العربية في معدل نصيب الفرد الى المستويات المختلفة من التنمية الاقتصادية والاستهلاك. تؤشر الفوارق الضخمة في معدلات دخل الفرد إلى التباينات الكبيرة بين البنى الاقتصادية السائدة في الدول العربية وما ينجم عنها من منعكسات اجتماعية وتنموية تجعل من الصعب تصنيفها في مجموعة واحدة دون التمييز بين المجموعات الاقتصادية المختلفة تبعاً للتطور الاقتصادي السائد لا سيما دخل الفرد الذي يعد حاسماً في تقييم مقدرة الأفراد للوصول الميسر للمستلزمات المعيشية وما ينتج عنها من معدلات عالية لإنتاج النفايات. لمراعاة هذه الفوارق بين الدول فقد اعتُمدت في هذه الدراسة طريقة أطلس للبنك الدولي [15]، للتميز بين مجموعات الدول تبعاً لمتوسط حصة الفرد من الدخل القومي الإجمالي ووفقاً لهذه الطريقة جرى تقسيم الدول العربية إلى أربع مجموعات وفق الجدول رقم 2.

بالرجوع الى الشكل رقم 2، نجد أن أعلى معدلات انتاج النفايات بالنسبة للشخص في اليوم يقع في الدول ذات الدخل المرتفع واقلها يتوافق مع الدول ذات الدخل المنخفض. فالدول النفطية هي من أكبر مولدي النفايات بالمنطقة العربية. علاوة على ذلك، فإن معدل توليد النفايات في المدن أعلى بكثير منه من المناطق الريفية، بمتوسط 1.38 كيلوجرام للفرد في اليوم. ولكن يجب ملاحظة أنه يمكن أن يكون معدل التوليد الفعلي في بعض الدول العربية التي بها متوسط أعلى من القيمة المبلغ عنها. ويرجع السبب في وجود عيوب في نظام إدارة النفايات الصلبة بما في ذلك القوى العاملة غير المدربة وممارسات المجتمع العشوائية ونقص مركبات التجميع.

جدول رقم 2: فرز الدول العربية إلى مجموعات تبعاً لمتوسط حصة الفرد من الدخل القومي الإجمالي مقدراً بالدولار الأمريكي [15].

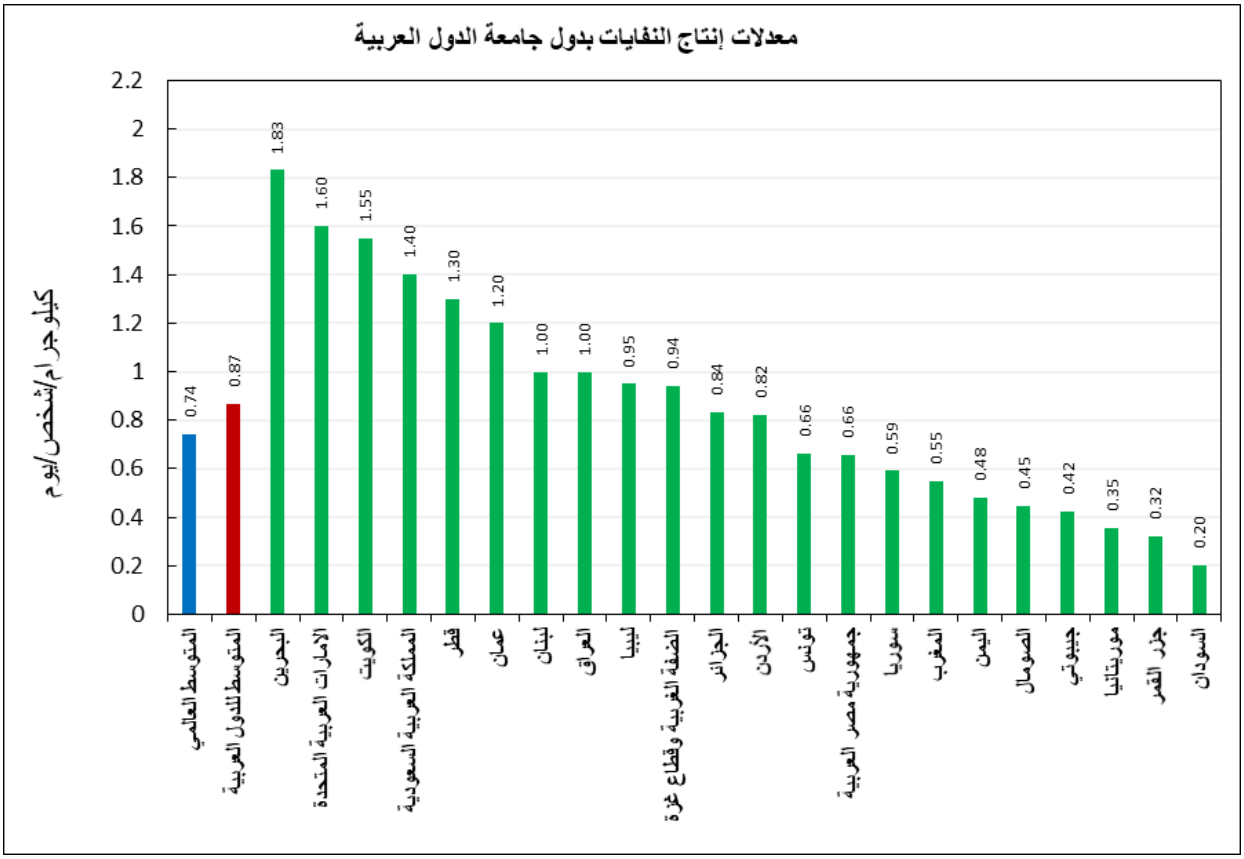
المجموعة	الدولة (حصة الفرد من الدخل القومي الإجمالي مقدرا بالدولار الأمريكي)
الدخل المرتفع (High Income) (أعلى من 12736 دولار للفرد)	قطر (90420)، الكويت (55470)، الإمارات (43480)، السعودية (26340)، البحرين (21330)، عمان (18530)
الدخل المتوسط الأعلى (Higher Middle-Income) (أعلى من 4126 وأدنى من 12736 دولار للفرد)	لبنان (9880)، ليبيا (8020)، العراق (6410)، الجزائر (5340)، الأردن (5160)، تونس (4210)

الدخل المتوسط الأدنى (Lower Middle-Income) (أعلى من 1045 وأدنى من 4126 دولار للفرد)	مصر (3280)، المغرب (3020)، فلسطين (3090)، السودان (1740)، سوريا (ت)، اليمن (1370)، موريتانيا (1260)
الدخل المنخفض (Low Income)	جزر القمر (840)، جيبوتي (غير متوفرة)، الصومال (غير متوفرة)

فعلى سبيل المثال أن معدلات جمع النفايات لمدن مختارة مثل القاهرة ونواكشوط والرباط وتونس هي فقط 77% و15% و90% و61% على التوالي. وطبقا لتقرير البنك الدولي لسنة 2018 نجد أن متوسط جمع النفايات في المنطقة العربية تصل الى 90% بينما تصل هذه النسبة الى 74% فلي المتوسط للمناطق الريفية مع ملاحظة وجود تباين كبير بين الدول العربية. ففي قطر، يتم جمع 100% من النفايات الريفية. ومع ذلك، في تونس وجمهورية مصر العربية، يتم جمع 5% و15% من النفايات الريفية، على التوالي [1].

في المنطقة العربية يتم التخلص من حوالي 53% من النفايات في مكبات النفايات المفتوحة والغير الصحية كما هو مبين بالشكل رقم (3)، حيث يتم حرق أو التخلص من النفايات في الطرق أو الأراضي المفتوحة أو الممرات المائية. يوّضح الشكل رقم (3) أن ممارسات التخلص من النفايات تختلف بشكل كبير بين الدول العربية. حيث يمكن ملاحظة ان 6% فقط من النفايات يخضع لاستعادة المواد من خلال إعادة التدوير، بينما أقل من 3% من النفايات يتم تحويلها الى سماد و13% من النفايات يتم التخلص منها في مدافن صحية، وحدود 25% من النفايات يتم وضعها في مكبات متحكم نسبيا. أما تحويل النفايات الى طاقة فهو يمثل ما نسبته 0.04% فقط.

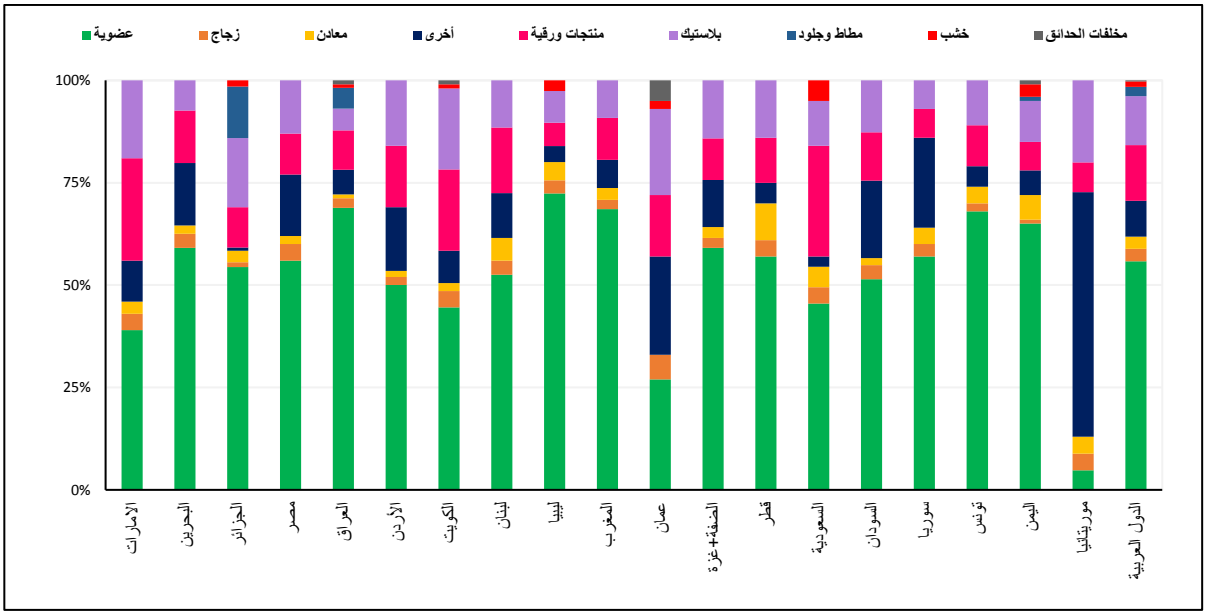
من الواضح أن انتاج الطاقة من النفايات ما يزال في مراحله الأولى في المنطقة العربية. حاليا توجد محطة واحدة لإنتاج الطاقة الكهربائية من النفايات بدولة قطر بسعة 30 ميجاوات قيد العمل. ولكن مع نهاية سنة 2020 ستدخل عدد من محطات توليد الطاقة من النفايات العمل في دولة الامارات العربية المتحدة. الجدول رقم (3) يبين مكونات وتركيبة النفايات بالمنطقة العربية. حيث تم احتساب هذه القيم من كمية كل نوع من النفايات لكل دولة من دول أعضاء جامعة الدول العربية نسبة الى الكمية الكلية لنفس النوع من ناحية، والقيمة الحرارية العليا لكل نوع من النفايات والمأخوذة من المرجع رقم [8]، [16] من ناحية أخرى. يمثل العمودين الأخيرين من الجدول (3) إجمالي المحتوى الحراري للمواد المختلفة. أما الشكل رقم 3 فيوضح خصائص النفايات البلدية الصلبة لكل دولة عربية. يمكن استنتاج ان كل الدول العربية بصفة عامة تمثل النفايات العضوية المكون الأكبر من بين كل الأنواع الأخرى.



الشكل رقم 2: معدل إنتاج الفرد من النفايات الصلبة البلدية في الدول العربية،[14].

جدول رقم 3: المحتوى الحراري للنفايات بالمنطقة العربية [14].

نوعية النفايات	النسبة	القيمة الحرارية للمادة ميجا جول/كجم	القيمة الحرارية للوقود (ميجا جول/كجم)
المواد العضوية	%56.07	4.0	2.2
البلاستيك	%14.2	35.0	5.0
الخشب	%1.3	18.59	0.2
الورق	%13.6	16.0	2.2
الزجاج	%3.0	0.0	0.0
المواد المعدنية	%3.13	0.0	0.0
نفايات اخرى	%8.7	11.0	1.0
إجمـــالي محتوى الطاقة الحرارية لـــخليط النفايـــات			10.6



الشكل رقم 3: خصائص النفايات البلدية للدول العربية [14].

4.تقنيات تحويل النفايات إلى طاقة ووضعها في المنطقة العربية

تعتمد الدول العربية إجمالا بشكل كبير على المكبات المفتوحة العشوائية غير الصحية لتجميع النفايات الصلبة البلدية؛ التي تسبب الكثير من الأضرار الصحية والبيئية فضلا عن تزايد توليد النفايات في المنطقة العربية بشكل مطرد، مما يستوجب ضرورة إعادة النظر في استراتيجيتها لإدارة النفايات عاجلاً وليس آجلاً. في الحقيقة أن الوقت قد حان لمراجعة خيارات تحويل النفايات الى طاقة لحل مشكلة النفايات في المنطقة العربية. فبالإضافة الى التخلص من النفايات؛ هناك فائدة إضافية أخرى للمنطقة من تقنيات تحويل النفايات الى مصدر إضافي للطاقة المتجددة. هذا بدوره سيزيد من نسبة مساهمة مصادر الطاقة المتجددة للدول العربية في خليط الطاقة الكلي للمنطقة. مع ملاحظة انه يمكن أن تكون النفايات بديلاً جذابًا للوقود الأحفوري نظرًا لأن إمداداتها لا تتأثر نسبيًا بالمواسم. فمحطات تحويل النفايات إلى طاقة تعمل على مدار الساعة وطوال أيام الأسبوع وطوال العام. لذلك يستمر سوق تحويل النفايات الى طاقة في العالم بالنمو باستمرار وتوسعت الى كل قارات العالم. بلغ إجمالي القيمة السوقية العالمية لقطاع صناعة الطاقة من النفايات إلى 24 مليار دولار في عام 2012 بمعدل نمو مركب 5.5%. يعد السوق العالمي لتحويل النفايات إلى طاقة كبيرًا ومن المتوقع أن يرتفع إلى 35.5 مليار دولار بحلول عام 2019. هناك عوامل أخرى تساهم في معدل النمو المرتفع هذا، وهي تقليل مساحة مكب النفايات وأمن الطاقة فهما أيضًا عاملين رئيسيين يدفعان الى تحويل النفايات إلى سوق توليد الطاقة [6].

في هذا السياق حددت عدد من الدول العربية وعلى رأسها دول مجلس التعاون الخليجي أهدافها في هذا المجال. ففي إطار استراتيجيتها الخاصة بتخفيض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون وذلك ضمن مساهماتها المحددة وطنياً، كان قطاع النفايات الصلبة البلدية أحد القطاعات الرئيسة المستهدفة بهذا الإجراء والتي يمكن بها تخفيف الانبعاثات بصورة كبيرة. على وجه الخصوص، تم تحديد إمكانية استعادة الطاقة من النفايات الصلبة البلدية كوسيلة للتخفيف من تغير المناخ. تم التخطيط للعديد من مشاريع تحويل النفايات إلى طاقة في دول مجلس التعاون الخليجي، ومعظمها في الإمارات العربية المتحدة كما مبين بالجدول 4. تم تقييم جدوى استخدام النفايات لتوليد الطاقة والفعالية المتوقعة لإنشاء محطات توليد الطاقة من النفايات في دول مجلس التعاون الخليجي في عدد من المنشورات [17]،[18]،[19]،[20]،[6]. ركزت الدراسات السابقة لتحويل النفايات إلى طاقة في دول مجلس التعاون الخليجي على توصيف النفايات، وتحديد إمكانات استعادة الطاقة، واختيار تقنيات تحويل النفايات الى طاقة المناسبة مع دخول المزيد من البلدان إلى السوق، من المتوقع أن تتطور تقنية تحويل النفايات إلى طاقة بسرعة وستنخفض التكاليف المرتبطة بهذه التقنيات خلال السنوات القادمة. من المهم ملاحظة أن نمو سوق تحويل النفايات إلى طاقة يتأثر بزيادة استخدام العمليات الحالية وتحسين كفاءتها، وكذلك الابتكار في تطوير تقنيات تحويل النفايات إلى طاقة [21]. تعتبر إمكانات سوق تحويل النفايات إلى طاقة بالمنطقة العربية كبيرة جدا، لأن معدل التخلص غير الضار من النفايات الصلبة المحلية منخفض جدًا وكمية النفايات الصلبة المحلية كبيرة وتزداد بسرعة. فإلى جانب وجود التشريعات والتوجيهات لقطاع صناعة الطاقة من النفايات، فإن عدد من الدول العربية وضعت خطط مستقبلية طموحة تطرح الأهداف والمتطلبات للتخلص من النفايات الصلبة المحلية. فحاليا، تبلغ طاقة التخلص من النفايات الصلبة البلدية في الدول العربية قيمة صغيرة جدا من إجمالي قدرة المعالجة غير الضارة للنفايات. إلا أنه على الرغم من أن التخلص من النفايات في مدافن النفايات هو الحل السائد حاليًا في المنطقة العربية، بدأت منطقة الخليج في طرح عدد من مبادراتها الضخمة في هذا المجال لتحسين تقنيات التخلص من النفايات الخاصة بها وأيضًا تعزيز التعاون المشترك بين القطاع الخاص والحكومات والبلديات. في قطر، هناك منشأة لمعالجة حوالي 3200 طن من النفايات يوميًا، وتعتبر نموذجًا مميزًا على مستوى الشرق الأوسط. من خلال هذه المنشأة تهدف قطر إلى تحقيق رؤيتها بمستقبل مستدام يضمن التخلص من النفايات بطريقة صديقة للبيئة، حيث وصلت قطر إلى تدوير 23% من نفايتها كنفايات الورق والبلاستيك والمعادن بعد أن كانت 8% فقط، كما تم تقليص الكميات التي كانت تستقر في المكبات إلى 64% بعد أن كانت تشكل 92% ولكن هناك فرق شاسع، فبينما في الماضي كانت النفايات تستقر في المكبات دون معالجة أما اليوم فهي لا تستقر إلا في مكبات المنشاة فقط وبعد معالجة حرارية وبالتالي يتم تحويلها إلى "رماد" ويمكن استغلالها كمادة بديلة وصديقة للبيئة تستغل في تعبيد الطرقات [22].

على الرغم من عدم وجود مشاريع إنتاج الطاقة من النفايات حتى الآن في المملكة العربية السعودية، أعلنت حكومة المملكة عن خطط لتطوير 3 جيجاوات في محطات تحويل النفايات إلى طاقة كجزء من استراتيجية 2030. في دولة الإمارات العربية المتحدة تتبنى العديد من المؤسسات مبادرات تحويل النفايات إلى طاقة. تتمثل هذه المؤسسات في الشركات الرئيسية وهي شركة طاقة بأبوظبي وشركة بيئة بإمارة الشارقة. من المتوقع أن يكون لدى "طاقة" محطة لتوليد الطاقة من النفايات بتقنية الحرق، وتخطط شركة بيئة لبناء مصنع الانحلال الحراري والتغويز [6]. تخطط شركة طاقة لإنشاء محطتين لتحويل النفايات الى طاقة وتخطط لمعالجة مليون طن/سنة من النفايات التي تحتوي على 50% من المواد العضوية و50% من الورق والورق المقوى والخشب. تتوقع شركة طاقة أن الطاقة المستخرجة من النفايات يمكن استخدامها لإمداد الطاقة لـــ 20 ألف منزل في أبوظبي [6]. من المتوقع أن يزيل المصنع أكثر من مليون طن من ثاني أكسيد الكربون سنويًا، كما سيوفر القدرة على إعادة تدوير الأجزاء المعدنية وإعادة استخدام الرماد في صناعة البناء. وفقًا لمؤسسة مصدر يمكن للكهرباء المولدة من الغاز الحيوي والسماد أن تكسب أبو ظبي حوالي 30 مليون دولار، وفي الوقت نفسه تساعد في تحقيق هدف أبوظبي المتمثل في الوصول إلى نفايات قريبة من الصفر [6]. من ناحية أخرى، تخطط شركة بيئة لبناء محطة معالجة النفايات باستخدام تقنية التغويز والانحلال الحراري. وبحسب بيئة، فإن المنشأة ستعالج حوالي 400 ألف طن سنويًا بقدرة تبلغ حوالي 85 ميجاوات، مما سيوفر الطاقة لعدد يقدر بـ 50 ألف منزل، كما سيساعد المدينة على تحقيق رؤيتها لتحويل مسار المكب بنسبة 100%. على الرغم من أن الشركتين تشتركان في رؤية مشتركة للحد من النفايات، وقد اختارت طاقة الترميد، بينما اختارت شركة بيئة تقنية التغويز/الانحلال الحراري [6].

جدول رقم 4: منشأت تحويل النفايات إلى طاقة بالدول العربية [14]

الدولة	عدد المحطات	اسم المحطة	سعة المحطة بالألف طن/ سنة	القدرة المركبة بالميجاوات	سنة التشغيل	كمية النفايات الصلبة بالمليون طن / سنة	ملاحظات
قطر	1	مسيعيد	570	30	2017	1.0	
الامارات العربية المتحدة	5	الشارقة	300	30	2020	5.41	
		الشارقة (منطقة السجى)	400	80			
		رأس الخيمة		2			
		دبي (الورسان)	1825	185	2020		
		أبوظبي		100			
البحرين		عسكر	390	25		0.951	
عمان			803		2023	1.73	
الكويت		كابد	1195	100		1.75	
السعودية						16.12	حددت المملكة العربية السعودية هدفًا طموحًا لتوليد الطاقة من النفايات بقـــــدرة 3 جيجاوات في عام 2030.
تونس						2.71	
ليبيا						2.147	
الجزائر						12.37	
المغرب	1	أم عزة	850		2015	6.85	توليد الغاز الحيوي
مصر						21.0	حددت جمهورية مصر العربية هدفًا لتوليد الطاقة من النفايات بقـــــدرة 300 ميجاوات في عام 2025.
الأردن	1	مكب الغباوي	1460	4.8	2019	2.53	يتم جزئيا استخراج الطاقة من هذا المكب ليتم تزويد محطة بقدرة 4.8 ميجاوات لإنتاج الطاقة الكهربائية. أي انه في هذه المرحلة لم يتم استغلال كل كمية النفايات المذكورة في الجدول.
العراق						13.14	لا يوجد
لبنان						2.04	لا توجد
السودان						2.83	لا توجد
موريتانيا						0.454	لا يوجد
سوريا						4.5	لا يوجد
الصومال						2.32	لا توجد
جيبوتي						0.115	لا توجد
اليمن						4.83	لا يوجد
الضفة الغربية وقطاع غزة						1.387	لا توجد
جزر القمر						0.093	لا يوجد

علاوة على ذلك، في يناير من عام 2016، أعلنت شركة بيئة ومصدر (شركة أبو ظبي للطاقة المتجددة) خططهما للتعاون والمشاركة في تطوير المزيد من محطات تحويل النفايات الى طاقة في الشارقة والإمارات العربية المتحدة والمنطقة. ستجمع الشراكة بين تقنيات إعادة التدوير المبتكرة لشركة بيئة وخبرة مصدر في مجال توليد الطاقة وتحقيق محطتين إضافيتين لتوليد الطاقة من النفايات على الأقل سيتم إنشاؤهما بحلول عام 2021 [6]. أما بالنسبة لإمارة دبي، فإن أكبر منشأة لتحويل النفايات الصلبة البلدية الى طاقة في العالم تحت الإنشاء في إمارة دبي. سيستغرق بناء المنشأة حوالي 3 سنوات، ومن المقرر أن تبدأ العمليات في الربع الثاني من هذه السنة 2020. تبلغ طاقة المصنع في دبي 185 ميجاوات، وهو ما يقرب من 2% من استهلاك دبي السنوي للطاقة [10]. تأتي هذه الخطوة تماشيا مع الأجندة الوطنية لتقليل استخدام المكبات المفتوحة بنسبة 75% بحلول عام 2021، ولحماية البيئة من انبعاثات غاز الميثان من مدافن النفايات [6]. التحدي الأكبر الذي تواجهه صناعة توليد الطاقة من النفايات في هذه المرحلة يرجع إلى انخفاض تكلفة إلقاء النفايات في مدافن النفايات؛ وبناءً على ذلك، في محاولة للحد من استخدام المكب، ستبدأ بلدية دبي في فرض رسوم أعلى على مولدات النفايات بناءً على وزن ونوع النفايات التي يتم التخلص منها [6]. في البحرين، تتوقع منشأة عسكر للنفايات التي تبلغ تكلفتها 480 مليون دولار أن تبلغ طاقتها 1068 طنًا في اليوم عند إطلاقها، لتوليد ما يقرب من 25 ميجاوات من الكهرباء. لم يتم تحديد موعد لإطلاقها، لكن الدولة تهدف إلى الوصول إلى 700 ميجاوات من توليد الطاقة المتجددة بحلول عام 2030 بمزيج من تقنيات الطاقة الشمسية والرياح والنفايات. في الكويت، تم منح مصنع كابد للنفايات البلدية إلى طاقة إلى كونسورتيوم من الشركات في عام 2017. ومن المتوقع أن يعالج المصنع الذي تبلغ تكلفته 756 مليون دولار 50% من إجمالي النفايات الصلبة السنوية في الكويت، بسعة 3275 طنًا في اليوم وتوليد الكهرباء بطاقة تصل لـــ 650 جيجاوات ساعة في السنة. تخطط شركة الخدمات البيئية العمانية لتطوير منشأة لتحويل النفايات إلى طاقة إلى مياه يتوقع أن تولد ما يكفي من الكهرباء لتحلية حوالي 15050 متر مكعب من مياه البحر في الساعة في محطة التناضح العكسي. قالت السلطنة إنه إذا أثبت المشروع الذي تبلغ تكلفته 750 مليون دولار فعاليته، فيمكنه بناء منشأة ثانية بسعة أقل.

5.تقنيات تحويل النفايات الى طاقة

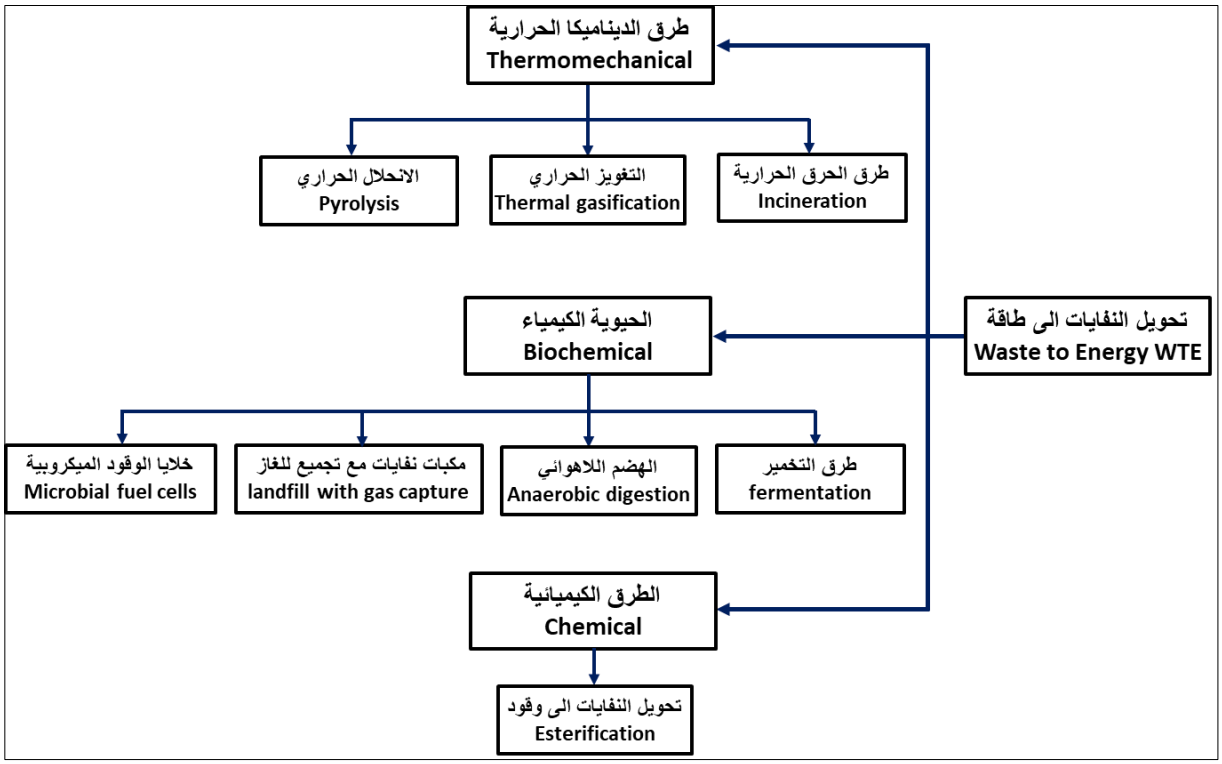
إن تحويل النفايات إلى طاقة ليس طريقة جديدة لتوليد الطاقة، مع الخطوات الأولى في الطريقة التي يعتقد أنها اتخذت في وقت مبكر من القرن الثامن عشر، لكن الممارسة اكتسبت أهمية مع زيادة مشكلة النفايات، لا سيما منذ دورة الألفية.

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 4)، يمكن تصنيف عمليات تحويل النفايات الى طاقة إلى ثلاثة أنواع رئيسية: طرق الحرارية-الكيميائية والكيمياء 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:

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

تعتبر تقنية حرق النفايات لإنتاج الطاقة هي أكثر التقنيات نضجًا لاستخراج الطاقة من النفايات في العالم الان [23]. 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 [24]. 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 [25]. 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% [25].



الشكل رقم 4: تقنيات تحويل النفايات إلى طاقة [14]

II. **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 صنــاعة الفولاذ والجير. في صناعة الاسمنت الأوروبية، يمكن أن يصل معدل الإحلال الحراري للوقود التقليدي بالنفايات إلى 80% [26]. 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 [25]. 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 [25].

III. **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 [8]. 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 [27]. 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.

IV. **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 [28].

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 [8].

V. 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 [29].

VI. **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 [29]. يتم إنتاج الغازات المختلطة والرماد والخبث والمعادن في نهاية التفاعلات في مفاعل التغويز. المواد الصلبة المتبقية مفيدة كركام الخرسانة والأسفلت.

VII. **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 [29].

.

جدول رقم (7): خصائص تقنيات تحويل النفايات الى طاقة [14]

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.

6.خارطة طريق مقترحة لمنشأة تحويل النفايات إلى طاقة في الدول العربية

اتخذت العديد من الدول العربية قرارات بالاستثمار في الطاقة المتجددة بما في ذلك تطوير مرافق تحويل النفايات إلى طاقة. هذه خطوة مهمة في الاتجاه الصحيح وقد تغير إدارة النفايات الصلبة المحلية في الدول العربية. يتطلب بناء مرفق تحويل النفايات إلى طاقة استثمارات كبيرة من الدولة. قبل الشروع في مشروع بهذا الحجم، هناك حاجة ماسة لخارطة طريق واضحة نحو الهدف النهائي لبناء منشأة تحويل النفايات إلى طاقة. تتكون خارطة الطريق المقترحة من ثلاث مراحل مميزة: مرحلة دراسة الجدوى ، ومرحلة التصميم والبناء ، ومرحلة التشغيل كما هو موضح في الشكل 5 [34].

I. مرحلة دراسة الجدوى

دراسة الجدوى هي الخطوة الأولى نحو بناء محطات تحويل النفايات إلى طاقة. يجب تحديد نطاق المشروع وأهدافه بالكامل في هذه المرحلة. الغرض من دراسة الجدوى هو تقييم الجدوى الاقتصادية والتقنية والبيئية والاجتماعية والقانونية لتطوير مشروع مرفق تحويل النفايات إلى طاقة.

التقييم الاقتصادي

تتضمن الجدوى الاقتصادية تحليل التدفق النقدي الشامل لتصميم المشروع وتكلفة البناء والتشغيل السنوي وتكلفة الصيانة والإيرادات السنوية. تشمل المصادر المحتملة لبيانات التكلفة والإيرادات المؤسسات المالية الدولية، والمنظمات غير الحكومية، والبلدان التي لديها خبرة حديثة في تحويل النفايات إلى طاقة، ومستشارون ومطورو الطاقة المتجددة الدوليون، والمؤلفات المنشورة. يجب إجراء تقنيات التحليل المالي مثل فترة الاسترداد والقيمة الحالية ومعدل العائد الداخلي لسيناريوهات بديلة. يجب أن يوفر التقييم الاقتصادي نظرة شاملة لجميع المتطلبات المالية للمشاريع والإيرادات المحتملة.

التقييم التقني

يتنبأ التقييم الفني بكميات النفايات الصلبة المحلية وتركيبها (تحديد مكوناتها) وتحديد أفضل الطرق لتحويل النفايات إلى طاقة بأحدث التقنيات. يجب مقارنة تقنيات تحويل النفايات الى طاقة البديلة المختلفة مع بعضها البعض في جوانب مزاياها / عيوبها بحيث يتم تحديد أنسب الطرق والتقنيات لتحويل النفايات الى طاقة. سيكون هذا مجرد تصميم مفاهيمي، ولكنه مفصل بدرجة كافية لإنتاج تقدير تكلفة دقيق بشكل معقول وجدول المشروع. يجب ان تحدد الجدوى الفنية:

- كمية النفايات بعد إعادة التدوير في المستقبل ،

- ملاءمة النفايات للمعالجة الحرارية ،
- تحديد التكنولوجيا المناسبة والفعالة ،
- التوافر الإقليمي المحلي للتقنيات المختارة
- تحديد العمر المتوقع للمصنع.

التقييم البيئي

يجب إعداد التقييم البيئي على أساس تقنيات المختارة لتحويل النفيات الى طاقة. يشمل التقييم البيئي جمع البيانات الأساسية البيئية مثل المناظر الطبيعية وجودة التربة والمياه الجوفية وجودة السطح وجودة الهواء والنظام البيئي للمنطقة المحيطة. يجب تحديد احتمالات تلوث التربة والهواء والمياه الجوفية والمياه السطحية والضوضاء. يجب تطوير وتقييم مجموعة من إجراءات التخفيف. يجب تحديد تكلفة تدابير التخفيف والجدول الزمني لتنفيذ تدابير التخفيف وإدراجها في تكلفة المشروع والجدول الزمني. الهدف الرئيسي من هذه المهمة هو التأكد من أن المنشأة المقترحة سوف تتوافق مع المعايير البيئية بالدول العربية والعالم [34].

التقييم الاجتماعي

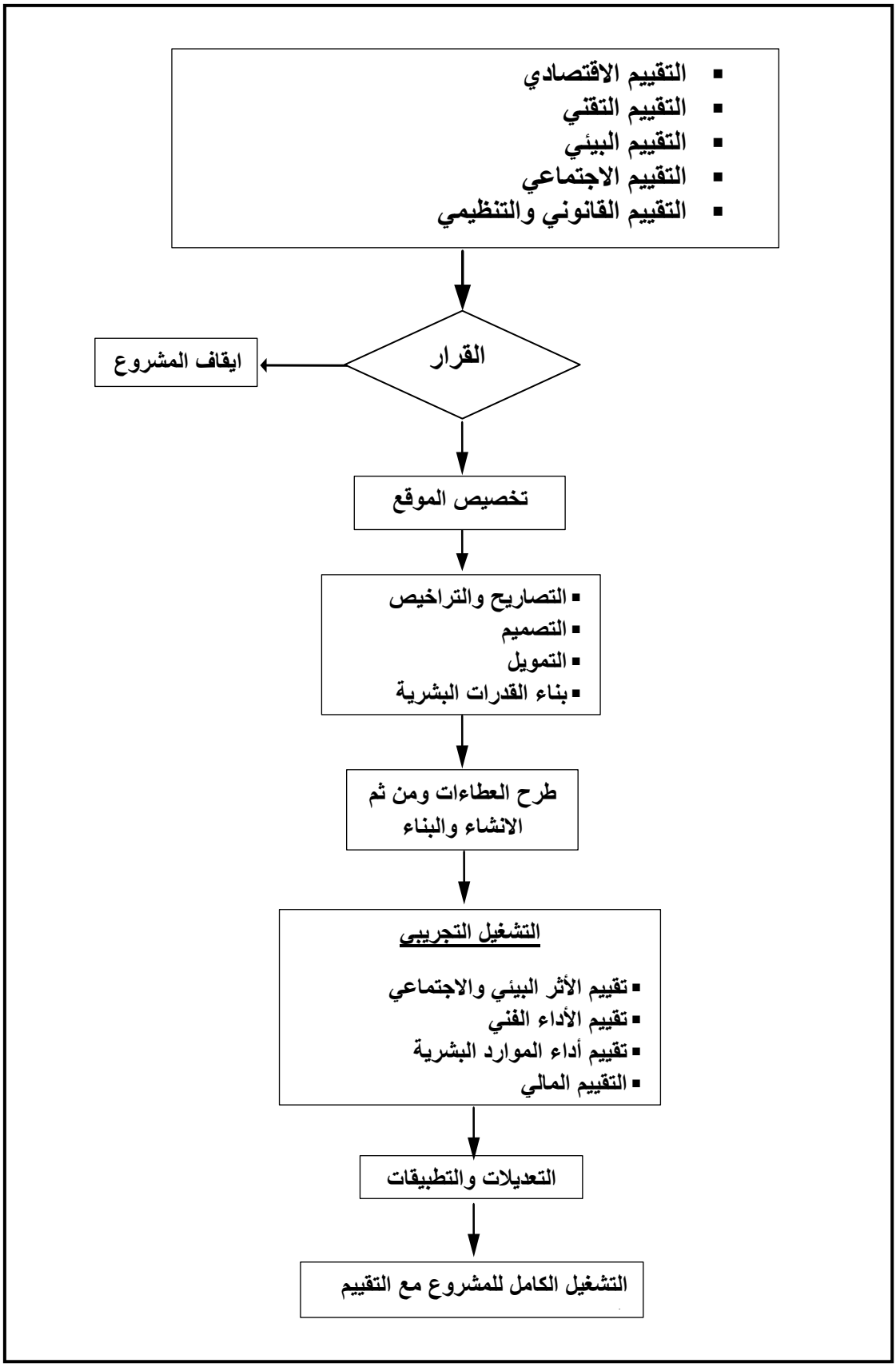
التقييم الاجتماعي أمر بالغ الأهمية لإنجاز مشاريع إنشاء محطات انتاج الطاقة من النفايات. حيث انه سيسهل القبول والدعم العامين في عمليات جمع وإعادة تدوير النفايات الصلبة البلدية وبناء محطات انتاج الطاقة من النفايات. يجب إجراء جلسات تشاور عامة بحيث يجب أن تشمل جميع قطاعات المجتمع بما في ذلك الذكور والإناث والموظفين العموميين والمنظمات غير الحكومية والمعلمين وعلماء الدين والطلاب وغيرهم. سيتم تحديد الفوائد والآثار المحتملة للمشروع، الاجتماعية والاقتصادية والبيئية. يجب توثيق ردود الفعل والاهتمامات العامة في تقارير التقييم الاجتماعي وإدراجها في التصميم النهائي للمشروع.

التقييم القانوني

في التقييم القانوني والتنظيمي، يجب ان تتم مراجعة آخر التطورات في قوانين الطاقة المتجددة والنفايات الصلبة ذات الصلة لمتطلبات التصاريح والترخيص المحلية. يجب أن تؤخذ قوانين البناء المحلية، وقوانين تقسيم المناطق بعين الاعتبار ومراجعتها.

تخصيص الموقع

يجب أن تأخذ عملية تحديد موقع المشروع في الاعتبار مواقع دفن النفايات الحالية، وطرق تجميع النفايات الصلبة المحلية، والشبكة الكهربائية ونقطة التغذية المقترحة في الشبكة، وقوانين البناء المحلية، ومراسيم تقسيم المناطق.



الشكل رقم 5: خارطة طريق مقترحة لمنشأة تحويل النفايات الى طاقة

II. مرحلة التصميم والبناء

سيتم إنفاق معظم استثمار رأس المال خلال هذه المرحلة. نظرًا لأن منشأة تحويل النفايات إلى طاقة لم يتم تصميمها وإنشاؤها من قبل في كثير من الدول العربية وتتضمن هذه المنشأة مكونات عالية التقنية، فقد تكون عقود التصميم والبناء والتشغيل والتحويل هي الخيار الصحيح لتطوير المشاريع القليلة الأولى. التقنيات متوفرة وهناك العديد من الشركات العالمية ذات الخبرة القوية في هذا المجال. تطلب السلطة المحلية من الشركات العالمية تكوين مشروع مشترك مع الشركات المحلية لتقديم عطاءات على المشروع. سيعزز المشروع المشترك نقل التقنيات والقدرة على بناء القدرات المحلية لتصميم وإنشاء وتشغيل مرافق تحويل النفايات إلى طاقة.

يجب على فريق التصميم اختيار أنسب تقنيات النفايات لتوليد الطاقة وإنتاج تصميم المصنع. يجب أيضًا تصميم جميع معدات المشروع بما في ذلك على سبيل المثال لا الحصر نظام معالجة المياه، والغلايات، والأنابيب الكبيرة وأنابيب البخار عالية الضغط، والتوربينات البخارية، والمكثف، وأجهزة والتحكم، والربط الكهربائي إلخ. يجب ات يتم تلبية المتطلبات البيئية والاهتمامات العامة من البداية في التصميم التفصيلي. يجب على فريق المشروع إعداد مستندات العطاء بناء على خبرات خاصة بهذه المشاريع [34].

المرحلة التشغيلية

أثناء التشغيل التجريبي، يجب مراقبة وتقييم الأداء البيئي والاجتماعي والفني والموارد البشرية والمالية. يتم إعداد وتنفيذ التعديلات وخطة التطوير للتغلب على أي قصور في أداء المشروع.

7. 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 [30]. 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، [31]. 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 [32].

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 [33].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%، [33]. 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.

8.المراجع

[1] A. Silpa Kaza, Lisa 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] I. . G. Cucchiella, F.; D'Adamo, "Sustainable waste management: Waste to energy plant as an alternative to landfill," *Energy Convers. Manag.*, vol. 131, pp. 18–31, 2017.

[8] 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.

[9] Marc J. Rogoff and Francois Screve, *Waste-to-Energy: Technologies and Project Implementation*, Third Edit. William Andrew, 2019.

[10] "Waste to energy," *UNEP (2019). Waste-to-Energy: Considerations for Informed Decision-Making*. UNEP (2019). Waste-to-Energy: Considerations for Informed Decision-Making, 2019, doi: 10.1002/cind.784_4.x.

[11] CEWEP, "Waste-to-Energy Sustainability Roadmap towards 2035," 2019.

[12] M. R. Darmezin, "Précis de Radiographie Dentaire, suivi de Notes sur l'Endodiascopie," *Arch.*

Roentgen Ray, vol. 10, no. 5, pp. 145–145, 1905, doi: 10.1259/arr.1905.0091.

[13] ERC, "2019 ERC directory of waste-to-energy facilities," *Energy Recover. Counc.*, pp. 1–52, 2018, [Online]. Available: http://energyrecoverycouncil.org/wp-content/uploads/2019/10/ERC-2018-directory.pdf.

[14] نوري الكشريو & جميلة مطر، "إمكانات إمكانات تحويل النفايات إلى طاقة في المنطقة العربية: دراسة حالة لدولة ليبيا"، قدمت للمجلة الدولية المحكمة لعلوم الهندسة وقنية المعلومات للنشر.

[15] W. Bank, "Gross national income per capita 2014, Atlas method and PPP, World Development Indicators database.," 2015.

[16] W. A. W. and P. A. Vesilind, *Solid Waste Engineering*, SECOND EDI. Publisher: Cengage Learning, 2012.

[17] M. Alsabbagh, "Mitigation of CO2e emissions from the municipal solid waste sector in the Kingdom of Bahrain," *Climate*, vol. 7, no. 8, 2019, doi: 10.3390/cli7080100.

[18] O. K. M. Ouda, S. A. Raza, A. S. Nizami, M. Rehan, R. Al-waked, and N. E. Korres, "Waste to energy potential : A case study of Saudi Arabia," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 61, pp. 328–340, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.04.005.

[19] M. Al-Maaded, N. K. Madi, R. Kahraman, A. Hodzic, and N. G. Ozerkan, "An Overview of Solid Waste Management and Plastic Recycling in Qatar," *J. Polym. Environ.*, vol. 20, no. 1, pp. 186–194, 2012, doi: 10.1007/s10924-011-0332-2.

[20] 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.

[21] C. M. D. E. L. Énergie, P. Gadonneix, Y. D. Kim, K. Meyers, G. Ward, and C. Frei, "World Energy Resources 2013," 2013.

[22] "MSW in Qatar." https://www.ecomena.org/msw-qatar-ar.

[23] 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.

[24] 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.

[25] 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.

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

[27] 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.

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

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

[30] Y. Tan, “Feasibility Study on Solid Waste to Energy Technological Aspects,” 2013, [Online]. Available: funginstitute.berkeley.edu/wp-content/uploads/2014/01/SolidWasteToEnergy.pdf.

[31] 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.

[32] 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.

[33] 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.

[34] Omar K. M. Ouda1, Huseyin M. Cekirge, "Roadmap for Development of Waste-to Energy Facility in Saudi Arabia", American Journal of Environmental Engineering 2013, 3(6): 267-272