

# Solid Waste Landfills as Carbon Sinks for Sequestration of Greenhouse Gases and Curtailment of Climate Change Phenomenon

<sup>1</sup>Sheikh Gloom; <sup>2</sup>Basel Alyousfi; and Sabah Aljenaid

<sup>1</sup>Geographical Information System Program, Collage of Graduate Studies  
Arabian Gulf University, Kingdom of Bahrain

<sup>2</sup>WHO Regional Center for Environmental Health, Jordon

## ABSTRACT

ID # (2732)

Received: 06/04/2013

In-revised: 15/01/2014

Correspondent Author:

Basel Alyousfi E.mail:

Basel61@gmail.com

## KEYWORDS

*Climate Change, Greenhouse Gases (GHG, Methane Gas (CH<sub>4</sub>), Solid Waste Management, Sanitary Landfill, Carbon Source, Carbon Sink, Carbon Sequestration.*

This paper concentrates on studying, analyzing and assessing the potential effects of Municipal Solid Waste Management (MSWM) on Climate Change (CC). The study was carried out through conducting a Greenhouse Gas (GHG) inventory, and calculating the past and future Methane Gas (CH<sub>4</sub>) emissions generated from Askar Landfill in Bahrain. The work was based on a methodology established by the U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) as well as an approach adopted by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) to determine the amounts of methane gas that can be generated from MSWM; and therefore to estimate, under different scenarios, the net amounts of methane gas sequestered and emitted from the landfill into the atmosphere. Specifically, the research approach, aimed at quantifying GHG emanating from Askar Landfill (whether released from or stored within the site) during the period 2000-2020. Also it aims at investigating the possibility of converting MSW from being a source of GHG emissions with adverse CC impacts to being a carbon sink to claim emissions reduction credits through proper management of such wastes. The amounts of biochemically biodegradable organic matter contained naturally within MSW were estimated throughout the study period, incorporating available data and future forecasts. The volume of methane gas emanating from Askar Landfill had reached 25 million m<sup>3</sup> in 2000 of a total mass estimated at 18 thousand tons or 106 thousand tons MTCE (Metric Tons Carbon Equivalent), of which 10 thousand tons MTCE were detained within the landfill while about 95 thousand tons MTCE emitted into the atmosphere. Such quantities of generated methane gas have increased in the year 2008 to reach about 98 million m<sup>3</sup> in volume and 69 thousand tons in mass (i.e., equivalent to 408 thousand tons MTCE), of which more than 40 thousand tons MTCE were sequestered within the landfill and 370 thousand tons MTCE discharged up to the outer atmosphere. In the Year 2020 (at the end of the landfill's design-life), considering population growth and MSW increase in Bahrain, the cumulative amounts of GHG predicted from Askar Landfill in terms of methane gas generation is anticipated to stretch up to 1975 million m<sup>3</sup> in volume and 8.3 million tons MTCE, of which 820 thousand tons MTCE is to be seized within the landfill and about 7.5 million tons MTCE is likely emit into the atmosphere, i.e., this is total over the entire 20 years period of landfill operation. From the above, it is clear that MSW sanitary landfills, though considered as significant sources of GHG emissions (particularly methane) contributing to global warming, are at the same time carbon storage vaults of some fractions of GHG resulting from the decomposing MSW mass as well as of the recalcitrant organic portions. The potential of carbon storage and sequestration at MSW landfills can be estimated at about 10 - 15% of the total quantity of biogas generated. As a result, the well-designed and operated landfills form carbon sinks and natural depots for GHG, positively impacting the climate change phenomenon. They can also be utilized to gain (and trade) credits from carbon emissions reduction in order to secure additional financial resources to help funding integrated wastes management systems.

## مدافن النفايات كمصارف كربونية لاحتجاز غازات الدفيئة والحد من ظاهرة تغير المناخ

اشيخة غلوم،<sup>1</sup> باسل اليوسفي، و اصباح الجنيد

<sup>1</sup> برنامج نظم المعلومات الجغرافية والإستشعار عن بعد، كلية الدراسات العليا،

جامعة الخليج العربي، مملكة البحرين

<sup>2</sup>المركز الاقليمي لصحة البيئة/ منظمة الصحة العالمية ، المملكة الأردنية الهاشمية

### المُستخلص

تركز هذه الورقة على دراسة وتحليل وتقييم الآثار المحتملة لإدارة النفايات البلدية الصلبة على تغير المناخ، من خلال جرد كميات غازات الدفيئة وتأثيراتها وحساب انبعاثات غاز الميثان (Methane Gas) الناتج من مدفن عسكر في مملكة البحرين خلال السنوات الماضية والمستقبلية، وذلك باستخدام منهجية وكالة حماية البيئة الأمريكية (USEPA) لسنة 2006 وتلك المعتمدة من قبل الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC). تستند هذه المنهجيات على تحديد غاز الميثان التي يمكن جمعه عوضاً عن إطلاقه إلى الغلاف الجوي، من خلال حساب السيناريوهات المختلفة لكميات غاز الميثان المتوقع اصدارها واحتجازها والذي في سياقها يتم معرفة صافي انبعاثات غازات الدفيئة من المدفن الى الجو. تهدف منهجية البحث الى تقدير كميات غاز الميثان الناجم سواء المنطلق منه أو المخزن/المحتجز من النفايات البلدية الصلبة في مدفن عسكر خلال الفترة الزمنية من عام 2000 الى 2020، و الى تقصي امكانية تحويل هذه النفايات من مصدر (Source) لانبعاث أحد غازات الدفيئة بتداعياتها السلبية على تغير المناخ الى مصرف لها (Sink) يساهم في حساب رصيد الكربون المحتجز في المدفن للاستفادة منه في تخفيض انبعاثات غازات الدفيئة الناجمة من ادارة هذه النفايات. لقد تم تقدير كميات المواد العضوية القابلة للتحلل البيوكيميائي والمحتواة بشكل طبيعي ضمن النفايات البلدية الصلبة خلال فترة الدراسة وذلك من خلال البيانات المتوفرة والتنبؤات المستقبلية، وتبين أن كميات غاز الميثان المنطلقة من المدفن المذكور قد وصلت الى 25 مليون متر<sup>3</sup> عام 2000 بكتلة قدرها 18 ألف طن أو ما يعادل 106 ألف طن من مكافئ الكربون (بالطن المترى) احتجز منها 10 ألف طن تقريبا من مكافئ الكربون ضمن مدفن عسكر وانطلق منها حوالي 95 ألف طن من مكافئ الكربون الى الغلاف الجوي، وازدادت نواتج غاز الميثان في العام 2008 لتصل الى حوالي 98 مليون متر<sup>3</sup> بكتلة قدرها 69 ألف طن بالغة حدود 408 الف طن من مكافئ الكربون (بالطن المترى) احتجز منها ما يزيد عن 40 ألف طن من مكافئ الكربون ضمن المدفن وانطلق منها حوالي 370 ألف طن من مكافئ الكربون الى الغلاف الجوي الخارجي. أما في العام 2020 ( تاريخ انتهاء العمر الافتراضي التصميمي للمدفن) فتشير التقديرات المستقبلية للكميات التراكمية لغازات الدفيئة الناتجة عن مدفن عسكر والتي تم حسابها بتقدير الكميات المتوفرة والازديادات المتوقعة في عدد سكان البحرين وبالتالي ارتفاع نسب النفايات البلدية الصلبة الناجمة عن ذلك الى مايلي: انتاج غاز الميثان الكلي سيصل الى 1975 مليون متر<sup>3</sup> بكتلة قدرها 8.3 مليون طن من مكافئ الكربون (بالطن المترى) يحتجز منها 820 ألف طن من مكافئ الكربون ضمن مدفن عسكر وينطلق منها حوالي 7.5 مليون طن من مكافئ الكربون الى الغلاف الجوي وذلك خلال فترة تشغيل المدفن كاملة (20عاما) . مما سبق يتضح أن مدافن النفايات الصلبة الصحية وان كانت تعتبر من أهم مصادر انبعاثات غازات الدفيئة (وخصوصا غاز الميثان) والتي تؤدي الى زيادة الاحتماس الحراري في العالم، الا أنها في الوقت نفسه تساهم بشكل ما في تخزين الكربون الناتج عن التحلل البيوكيميائي للكتلة العضوية المحتواة في النفايات البلدية الصلبة اضافة الى احتجاز الكربون الكامن في المواد العضوية الثابتة غير القابلة للتحلل، حيث تصل هذه الكمية المحتجزة الى حوالي 10 % - 15 % من كميات الغاز الحيوي الكلية الناجمة عن هذه المدافن. وبالنتيجة فان تصميم وتشغيل المدفن الصحي للنفايات بشكل فعال ومأمون هندسياً يجعله مصرفاً كربونياً أو خزانا طبيعياً لاحتجاز غازات الدفيئة الصادرة، وبالتالي رصيماً حسابياً لمبادلة تخفيضات انبعاثات الكربون بما يؤثر ايجاباً على تقليل ظاهرة التغير المناخي وتحقيق موارد مالية اضافية للإدارة المتكاملة للنفايات.

رقم المسودة: (2732)

تاريخ استلام المسودة: 2013/04/06

تاريخ المسودة المعدلة: 2014/01/15

الباحث المرسل: باسل اليوسفي

بريد الكتروني: Basel61@gmail.com

### الكلمات الدالة

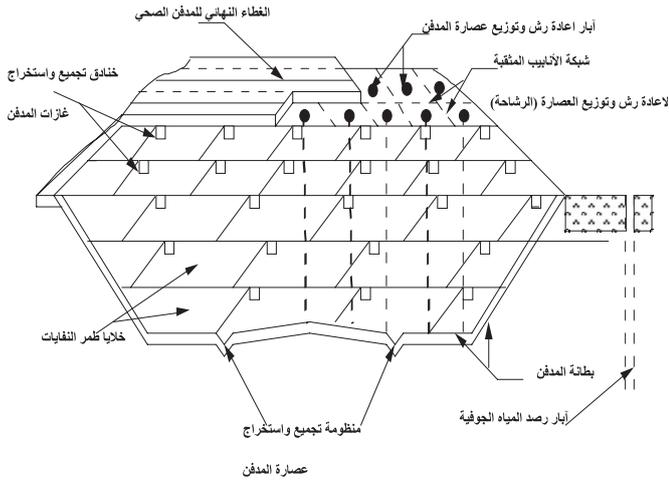
تغير المناخ، غازات الدفيئة، غاز الميثان، ادارة النفايات الصلبة، المدفن الصحي، مصدر كربون، مصرف كربون، احتجاز وتخزين الكربون.

## المقدمة

مع ازدياد عدد السكان وارتفاع مستوى المعيشة والتقدم الصناعي والتقني السريع تنوعت وازدادت كميات النفايات البلدية الصلبة الناتجة من الأنشطة البشرية المختلفة وأصبحت عملية التخلص منها من أبرز المشاكل التي تواجه المدن والتجمعات البشرية نظراً لما تشكله هذه النفايات من أخطار على البيئة ومواردها الطبيعية، وعلى صحة الإنسان وسلامته. لذلك فإن وضع نظام إدارة متكامل للنفايات البلدية الصلبة تعد من الحلول الضرورية بيئياً والمقبولة إجتماعياً والممتاحة اقتصادياً (زاهد، 1999).

يركز هرم نظام إدارة النفايات المتكامل (Waste Management Hierarchy) على عناصر أساسية تشمل الحد والتقليل من إنتاج النفايات، وإعادة الاستعمال والتصنيع، وإعادة تصنيع بعض مكونات النفايات لإستعمالها مرة أخرى، والتدوير، وإنتاج الطاقة والمواد المحسنة للتربة وغيرها من المنتجات من عمليات التحويل الحراري والحيوي والفيزيوكيميائي لبعض مكونات النفايات وأخيراً يندرج في قاعدة الهرم الدفن الصحي للمخلفات المتبقية التي لا يمكن إسترجاعها أو الإستفادة منها للتخلص الآمن منها (Reinhart, 2006). ولكن عندما يصعب تطبيق أساليب الإدارة السليمة والأمنة للنفايات بمكوناتها المترابطة دائماً (أي من المهد إلى اللحد) في بعض المناطق والمدن والبلديات بشكل تام ومتكامل، فلا مانع من النظر إلى اختيار وتوظيف بعض عناصرها المهمة والعمل على إدماجها ومكاملتها بشكل تدريجي. تعتبر مدافن النفايات الصحية، كمرحلة التخلص النهائي من النفايات جزءاً مهماً ورئيسياً في إستراتيجية الإدارة السليمة للنفايات وعلى البلديات والسلطات المحلية في البلدان النامية أن تعتمد في خطتها ضرورة إيجاد مواقع آمنة لتلقي ورمم النفايات بحيث تكون قادرة على إستيعاب الزيادة في حجم النفايات الناجمة في السنوات القادمة. فبدون تلك المواقع المنظمة لإدارة النفايات سوف يكون من العسير منع الطمر العشوائي والحرق غير المشروع، وبالتالي من المستحيل درء التلوث في المجتمع وجواره والبيئة المحيطة به. وتبرز على هذا الصعيد أهمية مدافن مرادم النفايات الصحية كحلٍ مبدئي وفعال قادر على التخفيف من المشكلة البيئية والصحية فيساهم في تخفيض التكلفة العامة لإدارة النفايات بل ويوفر مصدراً محتملاً للدخل أيضاً من خلال إمكانية بيع أرصدة انبعاثات غازات الدفيئة المرتبطة بجمع غاز المدافن (الميثان) وتحويلها إلى طاقة أو احتجازها في المدفن (اليوسفي 2009).

ومن الأساليب الحديثة المتبعة في هندسة المدافن الصحية وتشغيلها كمفاعلات حيوية (Bioreactor Landfill)، حيث يمكننا من خلال التصميم الهندسي والتنفيذ العملي والتشغيل المنظم باتباع طريقة إعادة تدوير العصارة أو الرشاحة (Leachate) السائلة الناتجة عن تحلل المواد العضوية (والمواد الأخرى) الموجودة في تركيب النفايات وتفاعلاتها ضمن مدافن النفايات خلال مراحل تحولها المختلفة، وبذلك يتم تطوير الطريقة التقليدية في الردم الصحي إلى طريقة أكثر حيوية ودينامية وذلك بجعل المدفن الصحي يعمل كمفاعل أرضي بيولوجي - كيميائي (الشكل 1)، يسرع ويحسن عمليات التحلل والتثبيت الحيوية ويوفر الطاقة الإستيعابية لتخزين ومعالجة العصارة الناتجة عنه ويزيد كمية الغازات البيولوجية (الميثان) الناجمة خلال عمليات التحلل اللاهوائي، والتي يمكن إستغلالها كمصدر من مصادر الطاقة (اليوسفي، 2009).



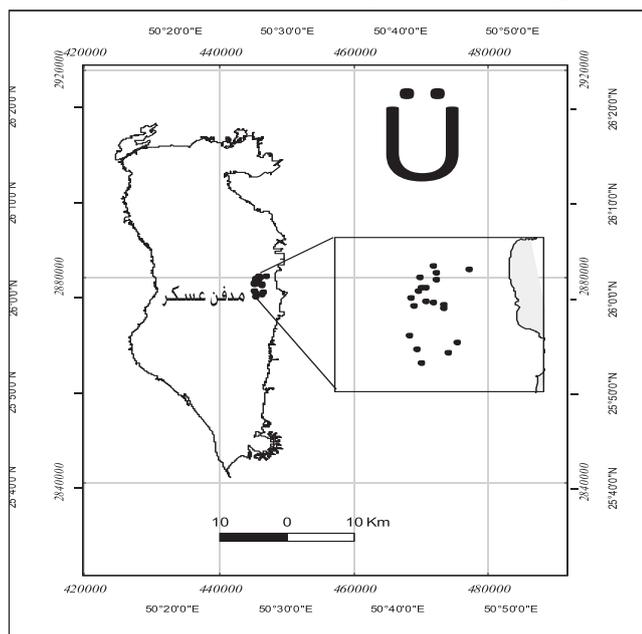
الشكل 1: مقطع في مدفن نفايات صحي مصمم كمفاعل بيولوجي أرضي (Al-Yousfi, 2003)

يمكن تشغيل المدافن الصحية بطريقتين إما كمفاعلات حيوية لاهوائية Anaerobic Bioreactors أو كمفاعلات حيوية هوائية Aerobic Bioreactor. وتعتمد المفاعلات اللاهوائية على تسريع عملية تحلل النفايات البلدية الصلبة من خلال التحكم بالرطوبة ودرجة الحموضة ودرجة الحرارة والمغذيات. أما المفاعلات الحيوية الهوائية فهي تعتمد على التحكم بكمية الرطوبة وتوفير الأكسجين من الهواء وضخها في المدفن لتسريع عملية تحلل النفايات البلدية الصلبة وتخفيض انبعاث غاز الميثان والرشاحة.

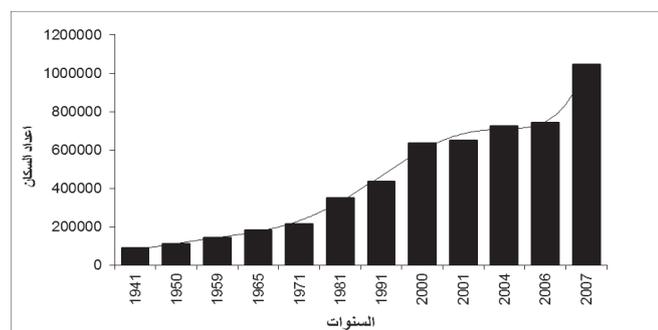
تتعرض النفايات البلدية الصلبة بعد دفنها في المدافن الصحية للعديد من التغيرات الكيميائية والفيزيائية والحيوية. وتعد التفاعلات الحيوية التي تقوم بها الكائنات الدقيقة من بكتيريا وغيرها من أهم تلك التفاعلات، إذ ينتج عنها غازات عديدة وعصارة خلال فترات الدفن المتلاحقة حيث تتحلل المكونات العضوية للنفايات هوائياً ولاهوائياً منتجة غازات المدفن والتي من أهمها غاز ثاني أكسيد الكربون ( $CO_2$ ) وبعض الميثان ( $CH_4$ ) ومكونات أخرى كالأمونيا ( $NH_3$ )، وكبريتيد الهيدروجين ( $H_2S$ )، والمركبات العضوية المتطايرة Volatile Organic Compounds. والميثان غاز أخف من الهواء وقابل للانفجار عندما يصل تركيزه في الهواء 5% - 15%. وأثناء تحلل النفايات تتكون سوائل حمضية نتيجة للتفاعلات الحيوية تختلط مع المياه الجوفية والسطحية المتسربة إلى داخل المدفن مكونة سائل شديد السمية يسمى عصارة النفايات أو الرشاحة. تحمل هذه العصارة الكثير من الملوثات العضوية والكيميائية والمعادن الثقيلة والأملاح الذائبة. وتشكل عصارة النفايات مصدر تلوث خطير للمياه الجوفية إذا وجدت طريقها إليها.

يمكن التحكم في انبعاثات غازات المدافن لضمان تقليل الأثر البيئي عند تحلل النفايات البلدية الصلبة، من خلال بطانة (Liner System) تعمل على منع تسرب الرشاحة إضافة إلى شبكة لجمع العصارة (الرشاحة) وتصريفها، ونظام لتجميع واستخراج الغاز الحيوي، والإستفادة من غاز الميثان الناتج من تحلل النفايات، حيث تتراوح معدلات إنتاج الغاز في النفايات العضوية الجافة بين 0.12 - 0.41 متر<sup>3</sup> / كغ (Reinhart, 2012). وعلى الصعيد العالمي، فإن المصادر البشرية هي المسؤولة عن إنتاج 60% من

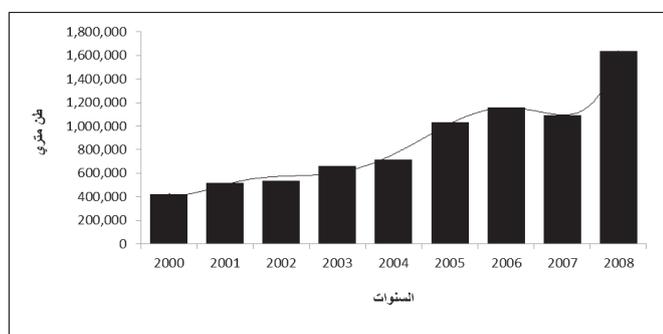
غاز الميثان سنة بعد أخرى.  
تبين الخريطة التالية (الشكل 2) موقع مدفن عسكر (غلوم، السكان (الجهاز المركزي للمعلومات، 2008) وكميات النفايات البلدية المرافقة (وزارة شؤون البلديات والزراعة، 2008) في مملكة البحرين (لاحظ أن كميات النفايات الصلبة المرافقة تزيد في توافق مع زيادة عدد السكان).



الشكل 2: موقع مدفن عسكر للنفايات البلدية في مملكة البحرين



الشكل 3: الخط البياني لزيادة عدد السكان في مملكة البحرين



الشكل 4: الخط البياني لزيادة كمية النفايات البلدية الصلبة في مملكة البحرين

غاز الميثان المتسبب في ظاهرة تغير المناخ (IPCC, 2007) حيث تعد مدافن النفايات البلدية الصلبة ثالث أكبر مصدر لإنبعاثات غاز الميثان، في حين أن مدافن الولايات المتحدة الأمريكية هي بالفعل المصدر الأكبر لإنتاج الميثان ممثلاً 26% من غازات الدفيئة في العام 2004 (USEPA, 2009). وعلى الرغم من ذلك لا بد هنا من التنويه إلى أن المدافن الصحية تعمل أيضاً على تخفيف تراكم الكربون في الغلاف الجوي من خلال عزل الكربون وتخزينه، وتعويض انبعاث كميات كبيرة من غازات الدفيئة وخصوصاً غاز ثاني أكسيد الكربون والميثان (Reinhart, 2006).

### دراسة الحالة (مدفن عسكر، مملكة البحرين)

تولي مملكة البحرين القضايا البيئية كثيراً من اهتمامها وتحديدًا فيما يتعلق بمعالجة النفايات البلدية الصلبة، خصوصاً مع إزدياد أعداد السكان (بما يعادل 2.7% سنوياً) حتى عام 2007، وتغير أنماط المعيشة والاستهلاك. هذا وقد تزايدت أعداد السكان في القرن الماضي لتزيد عن نحو 350 ألف نسمة في العام 1981، إلى ما يزيد عن 650 ألف نسمة في العام 2001، وقفزت إلى أكثر من نحو مليون نسمة في العام 2007. ولقد ترتب عن هذه الزيادة في أعداد السكان، إزدياد كمية النفايات البلدية الصلبة المتولدة عن النشاط الإنساني بشكل كبير، وكذلك عن تغير عادات وطبيعة الاستهلاك، حيث قدرت كمية النفايات البلدية الصلبة المجمعة من جميع المناطق السكنية بحوالي 3000 طن يومياً في العام 2007، و تزايدت من حوالي 660 ألف طن سنوياً في العام 2003 لتصل إلى نحو 1.6 مليون طن في العام 2008.

يتم التخلص من النفايات البلدية الصلبة في مملكة البحرين من خلال طمرها بدون معالجة في مدفن عسكر. ويقدر القائمون في مملكة البحرين على إدارة مدفن عسكر وحسب المعدل الحالي لإزدياد السكان ولنسب عمليات الدفن الحالية والمتوقعة فيه، أن الفترة الزمنية المتبقية لاستيعابه للنفايات لن تزيد عن نهاية العام 2020، مما يستوجب البحث والتقصي عن مواقع دفن جديدة تراعي الاشتراطات البيئية والاجتماعية والاقتصادية المختلفة.

تم في هذه الدراسة حساب كميات غاز الميثان الناتج والمحتجز والمنبعث من مدفن عسكر وذلك باستخدام منهجية مستمدة من نموذج تفاعل التحلل من الدرجة الأولى باستخدام إجراءات وجداول البيانات من الفريق الحكومي الدولي المعني بتغير المناخ (IPCC, 2007) وكذلك من وكالة حماية البيئة الأمريكية (USEPA, 2006) من عام 2000 إلى 2008 وحساب كتلته من خلال تحليل البيانات المتوفرة والمتعلقة بكمية النفايات البلدية الصلبة العضوية والقابلة للتحلل سنوياً في هذه الفترة. ومن ثم أعدت سيناريوهات مختلفة لحساب انبعاث غاز الميثان من مدفن عسكر في الفترة الواقعة بين عامي 2009 و 2020 (العمر الافتراضي للمدفن) وذلك من خلال حساب معدل النمو الطبيعي للسكان والذي بلغ عام 2007 حوالي 8.2% واستمر إلى عام 2010 (الطفرة السكانية في المملكة)، وكذلك من عام 2011 إلى 2020 حيث تم حساب إزدياد عدد السكان بمعدل النمو الطبيعي 2.7% المستخدم سابقاً قبل الطفرة، وتقدير مانتج عن ذلك من إزدياد في نسب توليد النفايات البلدية الصلبة والتي ستؤدي بالضرورة إلى زيادة إنتاج وانبعاث

## منهج البحث

## 1. منهج حساب كميات غازات المدافن

تعد النفايات البلدية الصلبة من المصادر البشرية الرئيسية التي ينتج عنها كميات كبيرة من غاز الميثان، والذي يقدر انبعاثه عالمياً بنحو 20-40 مليون طن في سنة 2007، وبالرغم من أن تركيز غاز الميثان في الغلاف الجوي أقل بكثير من غاز ثاني أكسيد الكربون، إلا أن إمكانية الاحترار العالمي له تعادل 21 مرة مقارنة مع غاز ثاني أكسيد الكربون.

إن غازات مدافن النفايات البلدية الصلبة هو عبارته عن خليط من الغازات المتحللة من المواد العضوية الواردة في النفايات الصلبة، ويتكون غاز المدافن من غاز الميثان وثاني أكسيد الكربون بنسبة تقارب 50% لكل منها من حيث الحجم. ويتوقف معدل توليد الميثان على طبيعة وتكوين كمية المواد المدفونة، فضلاً عن البيئة المحيطة بالمدفن. ولتقدير كمية غاز الميثان المتولد من المدافن الصحية في فترة معينة يجب توفر معلومات عن نوع وكمية النفايات، وكذلك خصائص المدفن كالحجم، ونوع التربة وكثافة النفايات. ولكن هذه المعلومات غير متاحة للجميع، لذلك تم وضع منهجية مستمدة من نموذج تفاعل التحلل من الدرجة الأولى (First Order Decay Model) باستخدام إجراءات وجداول البيانات من الفريق الحكومي الدولي المعني بتغير المناخ (IPCC, 2007) من أجل تقدير انبعاثات غاز الميثان الناتجة عن التخلص من النفايات البلدية الصلبة وذلك باستخدام المعادلة التالية:

$$DOC = [L_0 \times 6.74 \times 10^{-4}] \div [F \times 16/12 \times DOCf \times MCF]$$

DOC = تحلل الكربون العضوي

(Fraction, Gg C/Gg waste)

$L_0$  = إمكانية توليد الميثان ( $m^3 CH_4/Mg$  waste),

$6.74 \times 10^{-4}$  = كثافة الميثان ( $m^3/Mg$ ),

F = جزء من غاز الميثان من حجم النفايات البلدية الصلبة =

(Fraction of  $CH_4$  by volume in generated landfill gas (~ 0.5))

16/12 = نسبة الوزن الجزيئي للميثان /الكربون

DOCf = جزء من تحلل الكربون العضوي في الظروف اللاهوائية في المدافن

(Fraction equal to 0.5 for MSW),

MCF = معامل تصحيح الميثان في السنة =

تم في المعادلة أعلاه تقدير قيمة الكربون العضوي القابل للتحلل (DOC) الذي يساهم في انبعاث الميثان من النفايات البلدية الصلبة بحوالي 0.203 على أساس إمكانية توليد الميثان ( $L_0$ ) الذي يساوي 100 متر<sup>3</sup> / ميغا غرام ( $100m^3/Ton$ ) من النفايات (USEPA, 2006).

## 2. حساب كميات غاز الميثان من مدفن عسكري

يعتبر مدفن عسكري مصدراً ومصرفاً للكربون لذا تم في هذه الدراسة حساب كميات غاز الميثان المتولد من النفايات البلدية الصلبة (كأحد غازات الاحتباس الحراري) في مملكة البحرين في الفترة من 2000 إلى 2008 من خلال معرفة كميات النفايات البلدية الصلبة العضوية المنتجة والقابلة للتحلل (مكونات النفايات البلدية الصلبة في البحرين تحتوي على حوالي 60% من المواد العضوية) والتي

تم طمرها سنوياً في مدفن عسكري كما في الجدول التالي (الجدول 1)، كذلك تم تقدير هذه الكميات من غازات المدفن المتوقعة حتى بقية عمره الافتراضي التصميمي من خلال التنبؤ بكميات النفايات البلدية الصلبة العضوية المنتجة في الفترة 2009-2020.

**الجدول 1:** كميات النفايات البلدية الصلبة بالطن المتر في مملكة البحرين (2000-2008)

السنة	النفايات البلدية الصلبة	النفايات المجمعة من قبل الشركات الخاصة	المجموع
2000	260709	163227	423935
2001	311672	203756	515428
2002	329194	207627	536821
2003	383427	276420	659846
2004	393175	324578	717753
2005	457229	577692	1034921
2006	456495	699969	1156464
2007	520776	590254	1091948
2008	730819	908934	1639852

(المصدر: وزارة شؤون البلديات والزراعة، 2008)

وباستخدام المنهجية الرياضية آنفة الذكر تم تحديد كمية غاز الميثان المنطلق من مدفن عسكري من 2000 إلى 2008 و كتله وأحجامه. وتبين أن كمية غاز الميثان المنطلق من المدفن قد وصل إلى حوالي 25.5 مليون متر<sup>3</sup> في العام 2000 بكتلة قدرها 18 ألف طن، وبلغ 43 مليون متر<sup>3</sup> عام 2004 بكتلة مقدارها 30 ألف طن، وازداد انتاج غاز الميثان في 2008 ليصل إلى 98.4 مليون متر<sup>3</sup> بكتلة 69 ألف طن، كما هو موضح في الجدول 2. وبالطن المتري من مكافئ الكربون (Metric Tons Carbon MTCE: Equivalent) فلقد بلغ مجموع انبعاثات كتلة غاز الميثان في مملكة البحرين لعام 2000 ما يعادل 106 ألف طن متري، ووصل إلى 179 في العام 2004، وبلغ في العام 2008 ما يعادل 408 ألف طن متري من مكافئ الكربون، وتجاوز المجموع التراكمي الاجمالي لهذه الفترة (2000-2008) من انبعاثات كتلة غاز الميثان من مدفن عسكري 1.94 مليون من مكافئ الكربون بالطن المتري (أي بحدود 467 مليون متر<sup>3</sup>) كما في الجدول 2.

**الجدول 2:** حساب انتاج غاز الميثان من مدفن عسكري (2000-2008)

السنة	(هـ)	(د)	(ج)	(ب)	(أ)
2000	423935	254361	25.5	18	106
2001	515428	309256	31	22	128
2002	536821	322092	32	23	134
2003	659846	395907	39.6	28	164
2004	717753	430651	43	30	179
2005	1034921	620952	62	44	258
2006	1156464	693878	69	49	288
2007	1091948	655168	65.5	46	272
2008	1639852	983911	98.4	69	408
المجموع	7776968	466618	467	329	1940

(أ) كمية النفايات البلدية الصلبة (طن)، (ب) كمية النفايات الرطبة (طن)، (ج) كمية انبعاث غاز الميثان (مليون متر<sup>3</sup>)، (د) كتلة غاز الميثان الناتج (ألف طن) (هـ) مكافئ الكربون (MTCE) بالطن المتري \*10

**الجدول 4: سناريوهات تقدير إنتاج غاز الميثان من مدفن عسكر (2009-2020)**

السنة	(أ)	(ب)	(ج)	(د)	(هـ)
2009	1715742	1029445	103	73	427
2010	1856433	1113860	111	79	462
2011	1906557	1143934	114	81	475
2012	1958034	1174820	117	83	488
2013	2010901	1206541	121	85	501
2014	2065195	1239117	124	87	514
2015	2120956	1272573	127	90	528
2016	2178221	1306933	131	92	543
2017	2237033	1342220	134	95	557
2018	2297433	1378460	138	97	572
2019	2359464	1415678	142	100	588
2020	2423169	1453902	145	103	604
المجموع	25129138	15077483	1507	1065	6259
				(1.07 ~ مليون طن)	(6.3 ~ مليون طن)

(أ) كمية النفايات البلدية الصلبة (طن)، (ب) كمية النفايات الرطبة (طن)، (ج) كمية انبعاث غاز الميثان (مليون متر<sup>3</sup>)، (د) كتلة غاز الميثان المنطلق (ألف طن)، (هـ) مكافئ الكربون (MTCE) بالطن المتري \* 10

أما في الفترة ما بين 2011 و 2020 فقد تم حساب عدد السكان بمعدل النمو الطبيعي في المملكة والمقدر 2.7% (المعتمد قبل الطفرة السكانية)، وبما أن كميات النفايات البلدية الصلبة في ازدياد مطرد مع الزيادة الطبيعية في عدد السكان، فقد نتج عن ذلك ارتفاع في كميات إنتاج و انبعاث وتخزين غاز الميثان عند المدفن والذي يمكن تقديرها كما يلي في العام 2020 بحوالي 604 ألف طن متري من مكافئ الكربون غاز ميثان منتج، منها حوالي 550 ألف طن متري من مكافئ الكربون ينطلق الى الغلاف الجوي وحوالي 60 ألف طن متري من مكافئ الكربون سيتم احتجازها وتخزينها ضمن المدفن (أنظر الجدول 4 و 5 على التوالي).

تجدر الإشارة إلى أن الكميات التراكمية من إنتاج و انبعاث وتخزين غاز الميثان عند المدفن في الفترة الواقعة بين الأعوام 2009 و 2020 يمكن تقديرها بحوالي 1.07 مليون طن متري من غاز الميثان المنتج (أو مايعادل 6.3 مليون طن متري من مكافئ الكربون)، منها حوالي 5.7 مليون طن متري من مكافئ الكربون ينطلق الى الغلاف الجوي وحوالي 625 ألف طن متري من مكافئ الكربون سيتم احتجازها وتخزينها ضمن المدفن (أنظر الجدول 4 و 5 على التوالي).

لتحديد كامل إنتاج غازات الدفيئة من دفن النفايات في مدفن عسكر، تم جمع صافي انبعاثات غازات الدفيئة من توليد الميثان وتخزينه (احتجاز الكربون)، وكذلك تم حساب انبعاثات غازات الدفيئة الناجمة من نقل النفايات الى المدفن. ويبين الجدول 3 بأن صافي مكافئ الكربون المنطلق من مدفن عسكر تزايد بشكل ملحوظ، ففي سنة 2000 بلغ صافي مكافئ الكربون حوالي 96 ألف طن متري، في حين وصل إلى 235 ألف طن متري في 2005، وأصبح في 2008 حوالي 372 ألف طن متري، مما يدل على استمرارية انبعاث غاز الميثان من جراء عمليات الطمر المتعاقبة للنفايات البلدية الصلبة في مدفن عسكر، والتي تساهم أيضا في ازدياد حجم الكربون المختزن/المحتجز من غازات الدفيئة ضمن المدفن. وفي حين بلغ المجموع الصافي التراكمي لغاز الميثان المنطلق بهذه الفترة (2000-2008) من مدفن عسكر 1.77 مليون طن متري من مكافئ الكربون، بلغت كمية الغاز الاجمالية المحتجزة ككربون مختزن ضمن المدفن 194 ألف طن متري من مكافئ الكربون في نفس الفترة كما هو مبين في الجدول 3 التالي:

**الجدول 3: حساب صافي توزيع غازات الدفيئة الناتجة من مدفن عسكر كمكافئ للكربون (2000-2008)**

السنة	(أ)	(ب)	(ج)	(د)
2000	106	-11	1	96
2001	128	-13	1	117
2002	134	-13	1	122
2003	64	-16	2	150
2004	179	-18	2	163
2005	258	-26	3	235
2006	288	-29	3	262
2007	272	-27	3	248
2008	408	-41	4	372
المجموع	1940	-194	19	1770
				(~ 1.77 مليون طن)

(أ) مكافئ الكربون بالطن المتري من غاز الميثان \* 10<sup>10</sup> (ب) تخزين الكربون (ج) غازات الدفيئة المنبعثة من نقل النفايات (د) = (أ-ب-ج) صافي انبعاثات غازات الدفيئة من مدفن عسكر

وبما أن العمر الافتراضي لمدفن عسكر مصمم حتى العام 2020 فقد تم أيضا إعداد سناريوهات حساب إنتاج غاز الميثان عند المدفن بين الأعوام 2009 و 2020، وذلك من خلال حساب معدل النمو الطبيعي للسكان والذي بلغ سنة 2007 حوالي 8.2% واستمر إلى سنة 2010، والذي نتج عنه كمية انبعاثات من غاز الميثان تقدر بحوالي 79 ألف طن متري<sup>3</sup> في العام 2010 (أو مايعادل 462 ألف طن متري من مكافئ الكربون) كما في الجدول 4.

**الجدول 5:** سيناريوهات تقدير صافي توزيع غازات الدفيئة المنتجة من مدفن عسكر من (2009-2020)

السنة	(أ)	(ب)	(ج)	(د)
2009	427	-43	4	389
2010	462	-46	5	421
2011	475	-47	5	432
2012	488	-49	5	444
2013	501	-50	5	456
2014	514	-51	5	468
2015	528	-53	5	481
2016	543	-54	5	494
2017	557	-56	6	507
2018	572	-57	6	521
2019	588	-59	6	535
2020	604	-60	6	549
المجموع	6259	-625	63	5697
	(~6.3 مليون طن)			(~5.7 مليون طن)

(أ) مكافئ الكربون بالطن المترى من غاز الميثان \* 10<sup>3</sup> (ب) تخزين الكربون (ج) غازات الدفيئة المنبعثة من نقل النفايات (د) = (أ-ب-ج) صافي انبعاثات غازات الدفيئة من مدفن عسكر

### الخلاصة والاستنتاجات

يتبين من هذه الدراسة العلمية التطبيقية (غلوب 2010) أن المدافن الصحية، والتي توظف من أجل التخلص النهائي والأمن من النفايات البلدية الصلبة والمعتمدة كأحد العناصر الأساسية في الإدارة المتكاملة لهذه النفايات، تعتبر من أهم مصادر انبعاثات غازات الدفيئة وخصوصاً غاز الميثان الذي يعمل على زيادة الاحتباس الحراري وبالتالي على تفاقم التغير المناخي في العالم. إلا أنه لا بد من التنويه إلى أن هذه المدافن تلعب في الوقت نفسه دور المصرف الكربوني الذي يخزن ويحتجز غازات الدفيئة ويمنعها من الانطلاق إلى الغلاف الجوي الخارجي.

من أجل إيضاح هاتين الخصوصيتين المترافقتين ولكن المتناحرتين للمدافن الصحية (أي كمصادر ومصارف كربونية معاً) فقد تم أخذ مدفن عسكر في مملكة البحرين كحالة دراسة في حساب كميات غاز الميثان المنتجة سواء المنطلقة أو المختزنة خلال فترة تشغيل المدفن التصميمية (2000-2020) وتحديد قيمها الناجمة عن تحلل المواد العضوية في بيوكيميائياً، وذلك باعتماد المعادلات الرياضية المتفقة عليها من قبل وكالة حماية البيئة الأمريكية ومنهجية نموذج تفاعل التحلل من الدرجة الأولى المتبعة

من قبل الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ. لقد أظهرت الحسابات التطبيقية بأن مدفن عسكر يساهم في تخزين واحتجاز الكربون الناتج عن تحلل النفايات البلدية الصلبة بقيم مجزية تصل إلى حوالي 10%-15% من كمية الغاز الحيوي الكلي المنتج والمتوقعة عند المدفن، فقد بلغ حجم غاز الميثان المنتج في العام 2000 إلى 25 مليون متر<sup>3</sup> بكتلة قدرها 18 ألف طن أو ما يعادل 106 ألف طن من مكافئ الكربون (بالطن المترى) احتجز منها 10 ألف طن تقريباً من مكافئ الكربون ضمن مدفن عسكر وانطلق منها حوالي 95 ألف طن من مكافئ الكربون إلى الغلاف الجوي، وازدادت نواتج غاز الميثان في العام 2008 لتصل إلى حوالي 98 مليون متر<sup>3</sup> بكتلة قدرها 69 ألف طن والتي بلغت بحدود 408 ألف طن من مكافئ الكربون (بالطن المترى) احتجز منها ما يزيد عن 40 ألف طن من مكافئ الكربون ضمن المدفن وانطلق منها حوالي 370 ألف طن من مكافئ الكربون إلى الغلاف الجوي الخارجي. أما في العام 2020 (أي عند انتهاء العمر الافتراضي التصميمي للمدفن) فتشير التقديرات المستقبلية لحجم غاز الميثان وكمياته إلى 145 مليون متر<sup>3</sup> بكتلة قدرها 103 ألف طن والتي بلغت بحدود 605 ألف طن من مكافئ الكربون (بالطن المترى) يحتجز منها ما يزيد عن 60 ألف طن من مكافئ الكربون ضمن المدفن وينطلق منها حوالي 550 ألف طن من مكافئ الكربون إلى الغلاف الجوي الخارجي.

أما بالنسبة للكميات التراكمية كاملة لغازات الدفيئة الناتجة عن مدفن عسكر والتي تم حسابها بتقدير كميات غاز الميثان المتراكمة خلال فترة التشغيل (سواء الحالية المحسوبة أو المستقبلية المتوقعة) فهي على مايلي: في الفترة الواقعة في 2000-2008 (حيث كانت البيانات الاحصائية مسجلة ومتوفرة عند القيام بالدراسة) فلقد بلغ إنتاج غاز الميثان حوالي 467 مليون متر<sup>3</sup> بكتلة قدرها حوالي 1.95 مليون طن من مكافئ الكربون (بالطن المترى) احتجز منها بحدود 190 ألف طن من مكافئ الكربون ضمن مدفن عسكر وانطلق منها حوالي 1.8 مليون طن من مكافئ الكربون إلى الغلاف الجوي، أما خلال فترة التشغيل التصميمية الممتدة للمدفن في الفترة 2000-2020 فينتبئ أن يصل إنتاج غاز الميثان إلى حدود 1975 مليون متر<sup>3</sup> بكتلة قدرها 8.3 مليون طن من مكافئ الكربون (بالطن المترى) ومن المتوقع أن يحتجز/يخزن منها حوالي 820 ألف طن من مكافئ الكربون ضمن مدفن عسكر وأن ينطلق منها حوالي 7.5 مليون طن من مكافئ الكربون إلى الغلاف الجوي خلال فترة العشرين عام (وهو العمر الافتراضي لمدفن عسكر).

تؤكد هذه الدراسة بالحسابات العملية دور مدافن النفايات البلدية الصحية ليس في إنتاج غازات الدفيئة المساهمة في زيادة ظاهرة التغير المناخي فحسب وإنما في تخزين واحتجاز هذه الغازات كمصارف كربونية فعالة أيضاً، وهذا لا يتعلق فقط بغازات الميثان وثاني أكسيد الكربون المنتجة والمخزنة في المدفن وإنما يتعداه لاحتجاز الكربون الثابت والمحتوى في المواد العضوية المستعصية

**Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)** (2007) *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Solid Waste Disposal*. Institute for Global Environmental Strategies (IGES) on Behalf of the IPCC, Hayama, Japan, pp vol. 5 ch.3, pp1-40.

Available at: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html>

**Reinhart D** (2006) *The Landfill's Role in Sustainable Waste Management*. In: *Green Industry Conference 20-22 Nov. 2006*, Manama, Bahrain.

**Reinhart D; Amini H; and Bolyard S** (2012) *The Role of Landfills in US Sustainable Waste Management*, *Environmental Engineer and Scientist Journal*, **15** (1): 33-37.

Available at: <http://www.aees.org/publications-environmentalengineerandscientistjournal-online.php>

**USEPA (United States Environmental Protection Agency)** (2012) *Solid Waste Management and Greenhouse Gases: Life-cycle Assessment of Emissions and Sinks, Land filling, Waste Reduction Model (WARM)*. EPA Publication, Ver. 12. Environmental Protection Agency, Washington, USA. pp1-22.

Available at: <http://www.epa.gov/epawaste/conservetools/warm/SWMMGHGreport.html>

**USEPA (United States Environmental Protection Agency)** (2009) *Inventory of US Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2009*. EPA Publication No. EPA 430-R-11-005.) Washington, DC: U.S. Office of Atmospheric Programs, Environmental Protection Agency, Washington, USA.

Available at: <http://epa.gov/climatechange/emissions/usinventoryreport.html>

وغير القابلة للتفكك والتحلل. وعليه فإنه تجب الاستفادة من الغازات الحيوية المنبعثة من المدفن (ومن الرشاحة السائلة أيضا بتجميعها عبر أنابيب خاصة) لامكانية معالجتها واستخدامها في توفير الطاقة الكهربائية لعمليات التشغيل الخاصة بالمدفن نفسه، إضافة إلى تقصي فرص تزويد الفائض منها لسكان المنطقة المحيطة بمدفن عسكري (كمناطق الدور وعسكر وجو)، والأهم من ذلك استكشاف فرص جديدة لبيع الكربون المخزن/المحتجز منها كأرصدة تخفيض انبعاثات كربونية من ضمن مشاريع آلية التنمية النظيفة للدول الصناعية، وذلك في سبيل تشجيع استقطاب الاستثمارات الخارجية وتوطين التكنولوجيا المتطورة والصديقة للبيئة ورفع كفاءة القوى العاملة في المملكة في الوقت الذي نساهم فيه من الحد من ظاهرة تغير المناخ العالمية.

## المراجع

### المراجع باللغة العربية

الجهاز المركزي للمعلومات، مملكة البحرين (2008) الجهاز المركزي للمعلومات، مملكة البحرين.

Available at: <http://www.cio.gov.bh>  
**اليوسفي أحمد باسل** (2009) *الإدارة البيئية السليمة للنفايات الصلبة: المدافن الصحية كمفاعلات حيوية*، نشرة علمية صادرة عن برنامج الأمم المتحدة للبيئة (اليونيب UNEP) المكتب الإقليمي لغرب آسيا.

Available at: <http://www.unep.org.bh>  
**زاهد وليد محمد** (1999) *تطوير عمليات التخلص من النفايات البلدية الصلبة. ورقة عمل مقدمة في ندوة الإدارة المتكاملة للنفايات*، المعهد العربي لإنماء المدن 14-16 يونيو/حزيران 1999، جدة، المملكة العربية السعودية.

**غلوب شيخة محمد صالح** (2010) *تقييم الآثار المحتملة لإدارة النفايات البلدية الصلبة بمدفن عسكري على انبعاثات غازات الدفيئة في مملكة البحرين واختيار مواقع دفن جديدة باستخدام نظم المعلومات الجغرافية كلية الدراسات العليا، جامعة الخليج العربي (رسالة ماجستير غير منشورة)*  
 وزارة شؤون البلديات والزراعة، مملكة البحرين (2008) وزارة شؤون البلديات والزراعة، مملكة البحرين.

Available at: <http://www.municipality.gov.bh>

### المراجع باللغة الإنجليزية

**Al-Yousfi AB** (2003) *Sound and Integrated Solid Waste Management in the Arab Region*. In: *Regional Symposium on Treatment & Recycling of Municipal Wastes in the Arab Region* 7-9 Dec. 2003, Benghazi, Libya.