تطبيقات التكنولوجيا البيئية لحل مشكلة النفايات

(الزاوية كحالة دراسة)

جهاد المختار ضوء
الميكانيكا ، هندسة الموارد الطبيعية ، جامعة الزاوية ، الزاوية، ليبيا
j.daw@zu.edu.ly

ملخـــــص البحـــــث

الهدف من هذه الدراسة هو الدمج بين تخطيط أساليب التخطيط الاستراتيجي و تقنيات التكنولوجيا البيئية الحديثة و المستدامة المتبعة لإدارة النفايات الصلبة البلدية، في حل أزمة النفايات في مدينة الزاوية، كذلك معرفة كمية غاز المكب الناتج من(مكب ديله الصحي الافتراضي) وإمكانية استخدامها لتوليد الكهرباء.

تهدف الدراسة لاستكشاف فرص تحويل محاجر البناء المهجورة و المنتهية الصلاحية على شواطئ مدينة الزاوية إلى مكبات صحية و مستدامة،النفايات الصلبة البلدية في مدينة الزاوية الكبرى بلغت 224,83 طن. يوميا، لعدد سكان 306,351 نسمة،طرق إدارة المخلفات الحالية خطرة وغير مطابقة للاشتراطات الصحية،و التوجهات العالمية للاستدامة، نسبة الفقد اليومي بلغت 25%، مما ينذر بإشكالية تراكم النفايات داخل أحياء المدينة،وبالتالي تضاعف التأثيرات البيئية و الصحية و الاجتماعية على سكان المدينة،هذه الدراسة أجرت تحليلا استراتيجيا استطلعت فيه الفرص و التحديات لإدارة هذه المخلفات بطريقة صحية مستدامة وفق أسلوب إدارة المخلفات بتقنية (Sanitary Landfill)، رأت الدراسة توافر مواقع لمكبات مفتوحة لمحاجر مستهلكة قديمة ،من الممكن تحويلها لمكبات صحية مستدامة يتم فيها توليد الكهرباء عبر أسلوب(WtE)، ثم أجرت الدراسة تحليلا فنيا و اقتصاديا لمكب صحي افتراضي. ،منطقة(ديله) كانت هي الموقع المختار نظرا لتوافر عوامل اختيار المكبات بها،المساحة الإجمالية له كانت35000 م^2،برنامج (LandGEM v-303) , كان المستخدم لحسابات (H.S.D.L) ،قيمة

L_0 المحسوبة ل(H.S.D.L) كان $133 m^3/Mg$.معدل توليد الميثان **k** كان $0.02\ year^{-1}$ نظرا للطبيعة الجافة للمناخ الليبي و معدلات سقوط الأمطار 321 ملم .سنويا، الكميات القصوى من إجمالي إنبعاثات الغاز الكلية والميثان لمكب ديله الصحي $4.888E+06\ m^3/year$ و $2.444E+06\ m^3/year$، على التوالي،حدثت في السنة الأولى التالية لإغلاق المكب و المقترح عمره ب 10 سنوات من (2021–2031م) , مع معدل غاز مسترجع بلغ ($232\ m^3/h$) . أظهرت نتائج نموذج (LandGEM) كنموذج رياضي أن إجمالي الغاز و معدلات إنتاج الميثان في السنوات الأربع الأولى من دفن النفايات متوسطة. لتأثره بتيار النفايات الصلبة للمدينة كمية الطاقة لسنة2032م كانت4.17 قيقاوات.ساعة، العمر التشغيلي بصورته الاقتصادية من محطة ديله لتوليد الطاقة بالغاز من مكب النفايات سينتهي تقريبًا بالمعنى الاقتصادي بعد عام 2065. عليه ،الطاقة المتوقع الحصول عليها للسنوات (2021–2036) بلغت 40.78 قيقاوات.ساعة , تكفي لسد احتياجات 22.520 نسمة, أو 3753 منزل بالمدينة ،إذا علمنا أن متوسط استهلاك المواطن الليبي من الكهرباء 1811 كيلوات .ساعة، بحسب آخر تقرير للبنك الدولي في (2014)، استنادا إلى أن كفاءة تجميع غاز المكب كانت 75% و المحرك المستخدم هو المحرك الترددي بكفاءة تصل 41%، حجم غاز الميثان الكلي المنبعث من المكب بكفاءة تجميع 75% خلال عمر المشروع كانت 17.9 مليون متر^3 بكتلة قدرها 241166.75 (طن مكافئ من CO_2)، يحتجز منها 24,117 ألف طن من مكافئ الكربون ضمن مكب ديله، وينطلق منها حوالي 217,050 ألف طن من مكافئ الكربون إلى الغلاف الجوي ،و هو أيضا مقدار التخفيض من الكربون المتوقع لهذا المكب ، محققا 2,894,001 ($) عوائد من بيع الشهادات الخضراء .

1. المقدمة

الطريقة الحالية لإدارة المخلفات الصلبة البلدية لمدينة الزاوية غير آمنة و غير مستدامة والطريقة المتبعة حاليا في التخلص منها عبر المكبات المفتوحة، تتسبب باضطراد بمشاكل بيئية خطيرة منها ،انبعاث الغازات الضارة ،تسرب العصارة إلى طبقات المياه الجوفية،انتشار الروائح الكريهة و القوارض. المحاجر المنتهية الصلاحية أصبحت وسيلة للتخلص بشكل خطير من المخلفات البلدية الصلبة و غيرها من المواد الضارة من جهات مختلفة صناعية،زراعية،طبية، من ضمن الملوثات كميات من الملوثات غير العضوية الخطرة مثل (**HAPs**)و (**VOCs**)و التي تتفاعل مع أشعة الشمس لتكون الضباب الدخاني،كما تم تحديد أكثر من 30 ملوثا عضويا خطيرا في المكبات المفتوحة بما فيها البنزين و التولوين و ايثيل البنزين و كلوريد الفينيل و التي يؤدي التعرض له إلى آثار صحية خطرة[1]، تقنيات التكنولوجيا البيئية قدمت الحلول لهذه المشاكل يأتي في أبرزها توليد الطاقة بالحرق و توليد الطاقة عبر إنتاج غاز المكب ،و هي ما تعرف بتقنيات (استخلاص الطاقة) ; بالتالي توظيف هذه المكبات يعتبر من الفرص النادرة و الاقتصادية لإنشاء مكبات صحية ،توفر إنتاجا مستداما للطاقة الكهربائية و السيطرة على الغازات المنبعثة من المكبات المفتوحة و تحقيق جزء من عملية استرجاع الطاقة،بالإضافة للقيمة المضافة التي يتم تحقيقها مثل، خلق الوظائف، توفير مصدر للطاقة الحرارية،تنويع مزيج الطاقة في ليبيا،دعم استقرار الشبكة،تحقيق عائد للسلطات المحلية.كما أن السعي للحصول على طاقة نظيفة و من مصادر متجددة أصبح من الأمور الملحة،تقنية غاز المكبات الصحية(**LFG**)،احد هذه المصادر،رغم انه يأتي في أسفل التسلسل الهرمي لتفضيلات (**MSW**) .

إلا أنها طريقة مستدامة و صحية و تبقى أولوية في غياب الأدوات الناجعة للبدائل الأكثر تفضيلا استنادا للوضع التقني و الاقتصادي و الإداري الحالي ،إن عملية اختيار طريقة التخلص و استرجاع الطاقة من النفايات الصلبة البلدية عملية تحتاج إلى جمع المعلومات حول المعايير اللازمة لإنشاء مكبات و بين المقارنة و المفاضلة بين

التكنولوجيات البيئية المختلفة لإدارة المخلفات البلدية الصلبة **[MSW]** ، هذا يتطلب البحث في الدراسات ذات العلاقة و المنهجية المتبعة في كل منها و أسباب اختيار و تفضيل طريقة عن غيرها.

د.الكشريو ن. و م. مطر ج.[14] يقدمان دراسة حول إنشاء محطة توليد الطاقة بأسلوب الحرق أو الترميد (**waste to energy**) , حيث يشير إلى أنها الطريقة الأكثر نضجا من الناحية الفنية و الاقتصادية (على أساس الظروف الخاصة بطرابلس)،حيث يستعرضان منشاة بقدرة 100 ميجاوات حرارة من النفايات لمحطة بسعة 27 ميجاوات و إنتاج افتراضي سنوي يصل ل 201 ميجاوات ساعة سنويا باستخدام برمجية **SAM** بتكلفة تثبيت تصل الى100.7 دولار/ميجاوات ساعة،كما تم إجراء التحليل الاقتصادي عبر اختبار تحليل الحساسية .

د. بادي إ.،حميدة ع. و الفقيه ع. **[15]** قدموا دراسة جدوى لتوليد الطاقة من المخلفات البلدية بمدينة مصراته،استعرض طرق إدارة النفايات ،و شرح بالتفصيل مكونات النفايات الصلبة،ثم بين مجموعة من المؤشرات الاقتصادية و أجرى اختبار الحساسية لبيان مؤشرات الربحية.

الباحثان **Ş İlknur .Y Başak** .[5] قدما تحقيقا لتقدير كمية الغاز من مكب سيفاس بتركيا ،باستخدام طريقة التحلل الانحلالي من الدرجة الأولى، و من ثم تقدير كمية الطاقة الحرارية و الكهربائية الناتجة.

تعمل هذه الدراسة على الدمج ما بين التخطيط الاستراتيجي و تطبيقات التكنولوجيا البيئية في استكشاف حلول عملية ،مجدية للتخلص من مشكلة النفايات الصلبة داخل مدينة الزاوية،تتولى هذه الدراسة إنشاء مكب صحي(Sanitary Landfill) افتراضي،يتم من خلاله فرص توطين هذه التقنية عبر تقييم النتائج الفنية و الاقتصادية.

2. الجانب العملي و المنهجية:

طرق إدارة النفايات الصلبة البلدية اكتسبت مؤخرا أهمية اقتصادية لدورها التنموي و المستدام ، إنما اختيار طريقة الإدارة الأمثل وفقا لإمكانيات الموقع المختار يعتبر من ضروريات نجاح التقنية البيئية فنيا و اقتصاديا،لذا استطلعنا إمكانيات المدينة في توطين احد تقنيات استخلاص الطاقة و المفاضلة بينها.

1.2 التخطيط الاستراتيجي:

1.1.2 نقاط القوة.

تشمل نقاط القوة لاستخدام هذه التقنيات لحل مشكلة نفايات المدينة ما يلي:

1- مكبات جاهزة تقلل من تكلفة راس المال الأولي.

2- ملكية عامة للدولة بنسبة 80% من مساحة المكبات،هذا يقلل من تكاليف الاستثمار الأولي،و يوفر دخلا للحكومات المحلية عبر تأجير المكبات، و عوائد رسوم البوابة.

3- فرص لإنشاء مشاريع تكاملية جنبا إلى جنب مع توليد غاز المكب; الأسمدة،إعادة التدوير،معادن المكبات.

4- مواقع المكبات و قربها من بعض التجمعات السكانية(الحي السكني ديلة،مصفاة الزاوية)،يمكن أن توفر طاقة حرارية للتدفئة شتاء أو للتبريد،كما يمكن الاستفادة من تلك الطاقة في الزراعات السمكية و المحمية.

5-منع الغازات الضارة و تلوث المياه الجوفية الناتجة حاليا عبر المكبات المفتوحة.

6- مشكلة الصرف الصحي لمجمع ديلة السكني بالإمكان حلها عبر استخدام الحمأة الناتجة من عمليات معالجة الصرف الصحي و المواد العضوية في النفايات الصلبة للمجمع و المدينة ،في تسريع عملية التحلل اللاهوائي للنفايات، و هذا من شانه أيضا تقليل تكلفة إنتاج وحدة الكهرباء عبر تخفيض تكاليف النقل.

2.1.2 نقاط الضعف.

تتمثل نقاط ضعف توطين مثل هذه التقنيات البيئية بحسب الدراسة فيما يلي:

1- غياب القاعدة المعرفية و خبرة التجارب السابقة لتوطين و التعامل مع هذه التقنيات.

الحل المقترح: تضمين مثل هذه التقنيات في مقررات كليات الهندسة الليبية و تسكين وظائف الاستدامة،تقنيات البيئة ضمن ملاكات شركات الخدمات العامة.

2- الرفض المجتمعي المتوقع .

الحل المقترح: التوعية المجتمعية بأضرار الطرق الحالية في إدارة المخلفات البلدية، و أهمية التوجه إلى تقنيات أكثر أمنا و صحة و استدامة.

3- التنافسية مع مصادر الطاقة التقليدية:

يمكن تقديم مثل هذه التقنيات كخيار تنافسي،عبر إجراء المقارنة على أساس اقتصادي(LCOE) ،و تضمين العواقب و القيم المضافة البيئية و الاجتماعية المترتبة على استخدام كلتا التقنيتان.

4 – غياب التشريعات اللازمة لتوطين و استغلال مثل هذه التقنيات،المعتمدة عالميا كواحدة من مصادر الطاقات المتجددة.

2.2 تقدير كمية النفايات الصلبة: 2.2 Evaluation of (MSW) quantity:

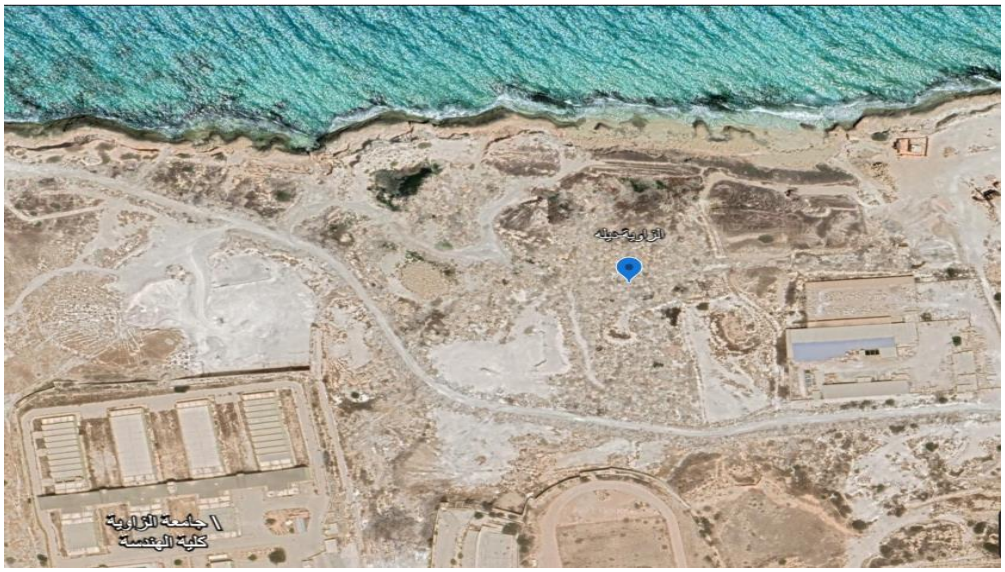
بيانات كمية (MSW) المتحصل عليها من إدارة شؤون الإصحاح البيئي بالبلدية،تبدو غير ذات موثوقية ،بسبب بعدها عن معدلات الدراسة العملية التي أجرتها جامعة طرابلس[2]، و التي تقدر كمية (MSW) اليومية ب 0.64 كيلوجرام/للشخص/يوميا،و بكثافة بلغت 74.4 كيلوجرام/متر^3،و هو أيضا ما يتوافق مع التقديرات العالمية و تقديرات الدول العربية و دول الجوار و الدول متوسطة الدخل،بينما كانت الأرقام المتحصل عليها من شركة الخدمات العامة ببلدية الزاوية بحسب بيانات سنة 2013،كانت 1.78 كيلوجرام/شخص/يوميا،لذا سنعتمد لحسابات هذه الدراسة البيانات المتحصل عليها من دراسة جامعة طرابلس.

3.2 وصف موقع الدراسة: 2.3 Description the study site:

مواقع المحاجر الواقعة على شواطئ المدينة في مجملها هي المستهدفة،و اختيارها يعد احد الفرص التي تدعم استخدام أسلوب (LFG) ،حيث يحقق ذلك ردم امن و صحي لتلك المساحات الشاسعة،توفير مصدر طاقة عبر الاسترجاع،خفض الانبعاثات و العواقب الضارة لأسلوب المكبات المفتوحة المتبع حاليا،تعظيم مبدأ الاستدامة عبر استخدام مصدر طاقة متجدد.

و لكن للحصول على نتائج أكثر دقة و واقعية ،تم تحديد موقع افتراضي لإقامة موقع مكب صحي.

الموقع يقع في منطقة ديله ؛ يبعد1.5 كلم عن مركز مدينة الزاوية يرتفع عن سطح البحر بمقدار24 مترا،يبعد عن الطريق الساحلي 2 كلم تقريبا،موقع مكب ديله الصحي الإفتراضي موضح في الشكل (1).



الشكل (1): الموقع المقترح لمكب ديله الصحي الإفتراضي N12˚44´E29˚47´

4.2 تحديد حجم المكب: 2.4 Determinant the Landfill Size:

إن تحديد حجم مكب معين، هو تحديد لعمر ذلك المكب ، لذا توجد عدد من النظريات القياسية لتصنيف المكبات الصحية استنادا لسعتهم [3] يصنف مكب الدراسة الافتراضي استنادا إلى مساحته إلى المكبات الصغيرة (اقل من

5 هكتار)،حيث تبلغ مساحته 35000 متر مربع،بعمق يصل إلى 22 متر،مشكلا حجما كاملا 770,000 م^3 ،يضاف إليه 15% مساحة إضافية للمرافق المكملة للمشروع لتصل المساحة الإجمالية للمكب 40250 م.^{2}

1.4.2 تقدير عمر المكب

تتكون فترة حياة المكب من ثلاث فترات (نشطة) و (إغلاق) و فترة (ما بعد الإغلاق) [3] ،تعتمد فترة الحياة النشطة على مساحة المكب المتاحة ،لكنها بحسب التقديرات المتعارف عليها من 10–25 سنة،بينما فترة الإغلاق و ما بعد الإغلاق تمتد إلى 25 سنة و هي التي تتم فيها عملية المراقبة و الصيانة.

فترة حياة (Sanitary DELA Landfill) النشطة، بحسب الحجم المقدر ومعدل الكبس المعتمد في المكبات الصحية الحديثة و هو ($0.8Mg/m^3$). استنادا لحجم استيعاب (Hypothec sanitary Dela landfill)،و عدد سكان مدينة الزاوية الكبرى حسب إحصاء 2020 م و المقدر ب 351306 نسمة ،بحجم توليد نفايات يومي 0.64 كلجم/شخص/يوميا،فإننا نقدر عمر (H.S.D.L) النشط ب 10 سنوات تقريبا.

2.4.2 تصميم المكب الصحي 2.4.2 Design of the sanitary landfill تتم

عمليات الطمر المتعارف عليها عند تشغيل المكبات الصحية بإرتفاع للنفايات قدره حوالي 20–22 مترا ضمن أماكن طمر تسمى خلايا، مترين تحت منسوب الأرض الطبيعية و 18 متر فوق منسوب الأرض الطبيعية [13]. تهدف عملية بناء المكب بالشكل التالي من أجل جمع المياه الراشحة عن المكب وضخها من حفرة التجميع إلى خارج المكب ومعالجتها.

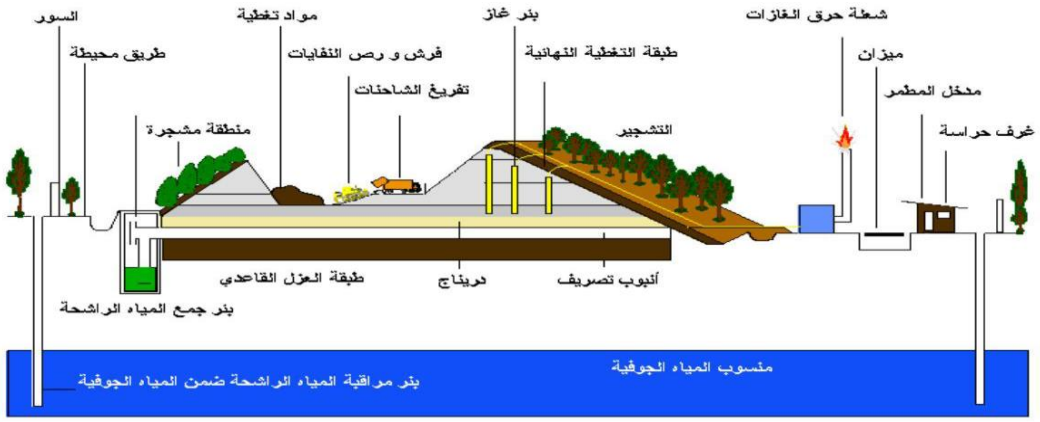
سوف تتم عملية طمر النفايات على مراحل وفق أسلوب خلايا الطمر وتتضمن كل مرحلة القطاعات التالية:

المرحلة الأولى :يتم بناء المكب الصحي على شكل قطاع أول يستطيع أن يستوعب حجم من النفايات الناتجة عن المنطقة المدروسة لمدة 10 سنوات.

المرحلة الثانية :يبلغ العمر التصميمي للقطاع الثاني للمكب الصحي 10 سنوات .يتم خلال هذه المرحلة إغلاق القطاع الأول من المكب بشكل أولى بحيث يمنع تشكل وانطلاق الغازات والروائح وتكاثر الحشرات والطيور و القوارض وانتشار المخلفات الورقية و البلاستيكية .تساعد عملية التغطية الأولية بشكل أساسي على حصول الانخفاضات الأولية ضمن جسم المكب والتي يمكن أن تصل إلى حوالي 20 % من ارتفاع المكب .بعد ذلك تبدأ مرحلة الانخفاضات الثانوية وهي لا تشكل نسبة عالية الانخفاضات الكلية.في هذه المرحلة يتم تغطية القطاع بشكل نهائي بواسطة شرائح البولي اتيلين.

المرحلة الثالثة :يبلغ العمر التصميمي للقطاع الثالث للمكب الصحي10سنوات .يتم خلال هذه المرحلة إغلاق القطاع الثاني من المكب بشكل أولى بحيث يمنع تشكل وانطلاق الغازات والروائح وتكاثر الحشرات والطيور الضارة وانتشار الأوراق[13].

وبالتالي يصبح العمر التصميمي للموقع بشكل عام 30 عاما.الشكل رقم (2) يوضح قطاعا راسيا لمكب صحي.



شكل (2):قطاع راسي لمكب صحي.

5.2 معايير الموقع: 2.5 Criteria of site selection:

المعايير المتبعة عالميا لتقييم موقع (مكب صحي) هي تنقسم بشكل أساسي إلى:

1-معايير بيئية 2-معايير ثقافية-اجتماعية 3- معايير تقنية 4- معايير اقتصادية.

هذه المعايير يستخدم لإيجادها نماذج رياضية عديدة أهمها (MCDM Method) و (AHP Method).

الموقع عموما يلبي عديد المعايير منها البعد عن السهول الفيضية،إمكانية التوسعة المستقبلية للمشروع،البعد عن مسطحات المياه،البعد عن أنابيب نقل المياه و خطوط نقل القدرة، انحدار المكب لا يشكل عائقا أمام عمليات الإنشاء أو التشغيل[4].

6.2 توصيف النفايات الصلبة البلدية: 2.6 Characterization of (MSW):

في نطاق إجراء البحث لم نتمكن من الحصول على توصيف لمحتوى(MSW) الخاص بمدينة الزاوية،لذا جرى تطبيق توصيف (MSW) لمدينة طرابلس نظرا للتشابه الكبير في أنماط الغذاء و المعيشة،إن نوعية مكونات (MSW) و خصوصا المحتوى العضوي عامل مهم في تقديرات (LFG) لموقع معين،المكونات التفصيلية ل (MSW) الليبية[2] موضحة بالجدول رقم (1):

جدول رقم(1):توصيف (MSW) بمدينة طرابلس[1].

التصنيف	النسبة%
المواد العضوية	36.3
الورق	15.3
المنسوجات	11.5
البلاستيك	18.6
زجاج	3.5
معادن	6.7
أخرى	8
المجموع	100

7.2 تحديد كمية النفايات الصلبة للبلدية 2.7 Determination (MSW) quantity.

كمية (MSW) المتولدة في منطقة ما ترتبط ارتباطا كبيرا بمعدل النمو السكاني،لذا فان الزيادة في (MSW) تزيد جنبا إلى جنب مع الزيادة السكانية،الطريقة الهندسية هي التي تم على أساسها حساب معدل الزيادة السنوي لمدينة الزاوية،المعادلة (1) توضح طريقة المتزايدة الهندسية لتقدير عدد السكان:

$$\log\frac{P_n}{P_o} = \log(1+R)^N \qquad (1)$$

حيث:

P_n: عدد السكان الأحدث.

P_o: عدد السكان السابق.

N: الفترة الزمنية بين سنوات التعداد.

R: معدل النمو السنوي للسكان.

بحسب بيانات مصلحة الإحصاء و التعداد الليبية و بيانات شركة الخدمات العامة بالزاوية كان عدد السكان المشمولين بخدمات الشركة لسنة 2013 م (330,380 نسمة)،و عدد سكان مدينة الزاوية لسنة 2020م(351,306 نسمة) ،عليه فان معدل نمو السكان السنوي تم حسابه على أساس 2%.

عملية كبس النفايات و هي الطريقة المتبعة في المكبات الصحية تعتمد 0.8 ton/m^3 [5] ،عليه فان كمية (MSW) التي سيستوعبها(H.S.D.L) تقدر ب 616,000 طن ، الجدول (2) يوضح كمية النفايات السنوية و النفايات عند المكب لعمر المشروع من (2021-2031م)

جدول رقم (2):كمية النفايات المكومة عند مكب ديله الصحي الافتراضي للفترة (2021-2031م)

Waste-In-Place	Waste Acceptance	User Waste-In-Place	User Waste Acceptance Inputs	Year
(Mg)	*(Mg/year)*	*(Mg)*	*(Mg/year)*	
0	83,706	0	83,706	2021
83,706	85,381	83,706	85,381	2022
169,087	87,088	169,087	87,088	2023
256,175	88,830	256,175	88,830	2024
345,005	90,606	345,005	90,606	2025
435,611	92,419	435,611	92,419	2026
528,030	94,267	528,030	94,267	2027
622,297	96,152	622,297	96,152	2028
718,449	98,075	718,449	98,075	2029
816,524	100,037	816,524	100,037	2030

8.2 وصف نموذج (LandGEM) 2.8 Description of the LandGEM method

الطريقة الأكثر موثوقية لحساب إنتاج (LFG) هي فتح آبار اختبار و قياس (LFG) المتجمع [10] و لكن هذه الطريقة مكلفة و العائق الرئيسي لتطبيق هذه النظرية هو ضرورة كمية كافية من النفايات في مساحة التخزين،لإنتاج كميات كبيرة من (LFG)،هنالك نموذج رياضي(LandGEM-v303) ،صممته وكالة حماية البيئة الأمريكية(AEP) لتقدير كميات غاز الميثان المنتجة من (LFG) و هو أداة ذات موثوقية و مطبق في اغلب الدراسات و البحوث المتعلقة ب (LFG) .

هذا النموذج يستخدم معادلة من الدرجة الأولى لمعدل الاضمحلال و ذلك لحساب معدل إنتاج (LFG) سنويا عبر فترة زمنية محددة الصيغة الرياضية موضحة في المعادلة 2 [5] .

$$Q_{CH4} = K.L_O.\sum_{i=1}^{n} M_i.e^{-k.t_i} \quad \ldots(2)$$

Where:

L_0 : سعة توليد الميثان المحتملة (m^3 CH4/ton waste)

k : ثابت معدل الاضمحلال (y^{-1})

n : عدد سنوات توليد الغاز

Mi : i^{th} كتلة النفايات المجمعة في السنة (ton/year)

Q_{CH4} : معدل توليد الميثان (m^3/year)

المعاملات المدخلة في واجهة البرنامج يأتي أهمها (k) و (L_0) ،حيث أن (k) ثابت معدل إنتاج الميثان دالة في محتوى التغذية،محتوى الرطوبة،درجة الحرارة،قيمة pH النفايات،بالإضافة لمعدل سقوط الأمطار ، مدخلات واجهة (LandGEM) موضحة في جدول (2) السابق .

1.8.2 حساب معدل إنتاج الميثان 2.8.1Calculte the methane production rate (k)

حساب معدل إنتاج الميثان (k) من الباراميترات الهامة لتقدير غاز المكب عند استخدام برنامج (LandGEM)، يتأثر كثيرا بمحتوى الرطوبة المتواجدة في النفايات و التي ترتبط كثيرا بمعدلات سقوط الأمطار السنوي بالموقع و التي كانت لمدينة الزاوية 321mm سنويا،و يحسب بالمعادلة (3)،[5]:

$$\mathbf{k = (3.2\times10^{-5} \times \text{annual precipitation in mm}) + 0.01} \quad \ldots..(3)$$

where:

$k=0.0202$ $year^{-1}$

2.8.2 حساب إمكانية توليد الميثان 2.8.2Calculte the potential methane production capacity (L_o)

يتم حساب إمكانية توليد الميثان(L_0) لمكب ديله الصحي الافتراضي وفقا لمعيار IPCC لعام 2006،و هذه القيمة تتفاوت من مكان لأخر استنادا لتغيير توصيفات (MSW)، باستخدام المعادلة (4) فان:

$$L_0\ (m^3/Mg) = [(DOC \times DOC_f \times MCF) \times F \times 16/12)] / 0.714 \quad \ldots(4)$$

و بالعودة إلى الجدول (1) المتعلق بتوصيف (MSW) لمدينة طرابلس سنة 2016 م باستثناء قيم D, B فإنها أخذت من دراسة[12] لدولة عربية اقرب ما تكون لتكوينات النفايات الصلبة في ليبيا،عليه يتم حساب (DOC)هو كمية الكربون العضوي القابل للتحلل وفقا للمعادلة(5) :

$$DOC = 0.4\ A + 0.17\ B + 0.15\ C + 0.3\ D \quad \ldots.(5)$$

حيث يمثل A الورق والورق المقوى والمنسوجات ، بينما يشير B إلى الأوراق والقش وغيرها ، ويشير C إلى نفايات الفاكهة والخضروات ، ويشير D إلى جزء الأخشاب / الأوراق في النفايات الصلبة المحلية.

استنادا للمعادلة (5)، فان قيمة (DOC) لهذه الدراسة وجدت:

$$DOC = 0.4\ (15.3+11.5) + 0.17\ (6) + 0.15\ (34.9) + 0.3\ (4.9)$$

$$DOC = 18.44\% = 0.1844$$

DOC_f= نسبة من الكربون العضوي المتحلل في المكب و هي تساوي افتراضيا 0,77 (عند درجة حرارة $35C^0$)

MCF عامل تصحيح الميثان و سنعتبره لحالة مكب صحي حديث =1

F نسبة الميثان الحجمية الناتجة ضمن غازات المكب،اغلب الدراسات تفترض 0.5 [12]

عليه:

فان قيمة L_0 لهذه الدراسة:

$$L_0\ (m^3/Mg) = [(0.1844 \times 0.77 \times 1) \times 0.5 \times 16/12)] / 0.714$$

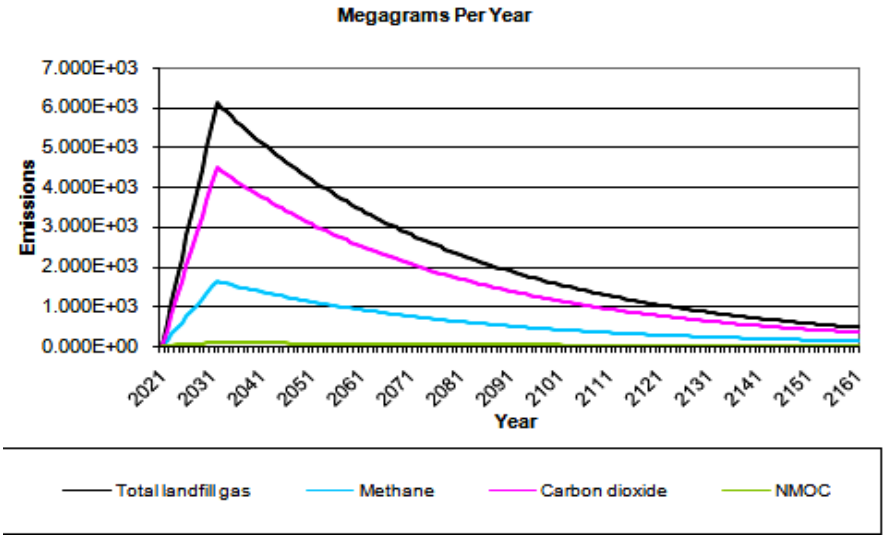
$$L_0 = 132.57 (m^3/Mg)$$

وصف البيانات المكملة لمدخلات البرنامج (LandGEM) موضحة بالجدول (3):

جدول رقم (3):المدخلات التكميلية لتنفيذ برنامج(LandGEM)

Model parameters	Statue	Value
Methane production rate	calculated	0.0202 $year^{-1}$
Potential methane production capacity	calculated	132.57(m^3/Mg)
NMOC concentration	default	4ppmv as hexane
Methane content	default	50% by volume

بعد تشغيل برنامج (LandGEM) وفق قيم الجدول (2,3)،فان معدلات إنتاج الميثان و مجموع الغازات المنبعثة من (مكب ديله الافتراضي تظهر كما في الشكل (3):



شكل رقم (3):الإنبعاثات الكلية لمكب ديله الصحي الافتراضي.

3. النتائج والمناقشة:

1.3كمية النفايات الكلية 3.1 Quantity of (MSW)

كانت كمية النفايات المقبولة بمكب ديله الصحي خلال الفترة 2021-2031 م (814,879 Megagrams)،هذه الكمية يمكن أن يضاف إليها حجم تخزين إضافي يصل إلى $630,000m^3$ بحسب تصميمات المكبات الحديثة التي يصل ارتفاعها 18 مترا [13] .

نسبة المواد العضوية منها 36.3% بحسب دراسة طرابلس، تقل كثيرا عن نسب المواد العضوية في مكة المكرمة و مدينة الرمادي العراقية حيث كانت فيهم النسب 48% و 61% على التوالي بينما تساوت تقريبا مع نسب مدينة سيفاس التركية 35.9%،و هذا يفسر انبعاثات الميثان بالمقابل لكل (طن من النفايات)لاحقا.

2.3 تقديرات غاز الميثان 3.2 Evaluation methane gas

على الرغم من فترة استيعاب المكب قدر ب 10 سنوات ،إلا أن توليد الغازات سيستمر لسنوات لاحقة طويلة،حيث يصل المكب لسعته بحلول عام 2031، كمية الغازات الكلية و غاز الميثان و ثاني أكسيد الكربون و الغازات العضوية غير الميثانية موضحة بالشكل (3)،أعلى كمية لغاز الميثان كانت $(m^3/year)$ 2.44E+06 ،حدث في سنة 2033 م،أي سنة بعد الإغلاق ، تزيد سنة التوليد الأعلى في هذه الدراسة من 11 إلي 7 سنوات عن دراسة مشابهة لمكب(سيفا- التركي)،يرجع ذلك بالأساس إلى محتوى الرطوبة(المرتبط بمعدلات سقوط الأمطار و بيئة المكب) في تلك المنطقة و بالتالي قيمة (k) و هي ثابت توليد غاز الميثان.

بحسب نتائج (LandGEM Software) ، اعتبارا من السنة الحادية عشر سيتناقص معدل إنتاج الميثان،يعود ذلك في تقديري لنقص مغذيات الميثانوجينات (Methanogens) بمرور الوقت،بالإضافة إلى تباين معدلات التحلل للمكونات المختلفة للنفايات.هذه المعدلات مهمة لإدارة المكب و لتقديرات

الجدوى.بيانات (LandGEM) تشير إلى امتداد نشاط انبعاث الغازات ل 140 سنة،النتائج المتحصل عليها ل 140 سنة موضحة بالجدول (4):

جدول رقم (4):ملخص نتائج (LandGEM Software) لمكب ديله الصحي(2021-2161)

كمية النفايات الكلية (Mg)	إجمالي كمية الميثان المتكونة (m^3, CH_4)	إجمالي الغازات المنبعثة (m^3)	وحدة الميثان المتكون (m^3 CH_4 /Mg waste)
1,018,599	**130,206,100**	**251,456,600**	**117.45**

3.3 Electricity generation from (LFG) 3.3 الكهرباء المتولدة من غاز المكب

عدة طرق لتحويل **(LFG)** إلى طاقة مفيدة مثال ذلك،الكهرباء،توليد البخار،وقود غلايات،وقود مركبات،أو مد خطوط إمداد بالغاز،تبقى الكهرباء هي اختيار هذه الدراسة، الغاز المتولد في مكب ديله الصحي الافتراضي،سيستخدم بشكل أساسي لتوليد الكهرباء ، الغاز المتولد بتقنية**(LFG)** يعتبر من غازات (Medium-BTU) [6] .محتوى الطاقة ضمن غاز المكب يعتمد على جودته، عمليا تتراوح النسبة 16-20 **MJ/m^3**، للجودة المنخفضة و المتوسطة و تصل إلى 30 **MJ/m^3** للنوعيات مرتفع الجودة **[6]** . غاز المكب بالإمكان تحويله لكهرباء عبر عدة تقنيات مثل التربينات الغازية،التربينات البخارية،التربينات الصغيرة،مع كفاءة تحويل تتراوح من 25% إلى 30%،كذلك تربيات الغاز الترددية تستخدم لذات الغرض بكفاءة تحويل تتراوح من 28-40%.

الطاقة المكافئة ل (1متر^3) من غاز الميثان تكافئ**5.13 k.w.h [5]**. انه من غير المعقول استرجاع كل الغاز المخزن في نفايات المكبات البلدية،لذا فان عامل الكفاءة المعتمدة على طريقة إدارة نفايات المكب

يمكن أن يخضع لأسلوب السيناريو ، و لكن لمكب ديله الصحي الافتراضي المغلق، سنفترض كفاءة تجميع الغاز (75٪)،وفقا لتصنيفات جدول رقم (5).

جدول رقم (5): متوسط كفاءة جمع **LFG** وفقًا لطرق التشغيل[5]

وصف تصميم و إدارة المكب	متوسط كفاءة التجميع
عدم وجود نظام جمع **LFG**	0%
مكب نفايات نشط يحتوي على نظام جمع **LFG** نشط من الآبار العمودية وغطاء يومي فقط .	67%
مكب نفايات نشط يحتوي على نظام جمع **LFG** نشط للآبار الرأسية و غطاء متوسط أو نظام جمع **LFG** نشط للخنادق الأفقية وتغطية يومية	%75
مكب نفايات نشط يحتوي على نظام جمع **LFG** نشط من الآبار الرأسية وغطاء رملي نهائي أو نظام تجميع **LFG** من آبار راسية و خنادق أفقية مع غطاء متوسط	87%
مكب مغلق يحتوي نظام تجميع **LFG** نشط بغشاء ارضي، النهج الفرعي **D**، أو غطاء مكافئ	95%

استنادا للمعلومات أعلاه ،فان كمية الكهرباء المتولدة من مكب ديله الصحي الافتراضي تحسب بالمعادلة(6) **[5]**.كمية الكهرباء لسنوات 2032,2031 و 2033 تم حسابها كم موضح أدناه:

$$E_{el}\ (kWs) = m_{dg} \times LHV_{dg} \times R \times \eta_{el} \quad \ldots (6)$$

حيث،

$\mathbf{M_{dg}}$ = المعدل الكلي لجريان غاز المكب (Nm^3/h)

$\mathbf{LHV_{dg}}$ = المكافئ الحراري لغاز المكب(KWh/Nm^3)

R = كفاءة تجميع الغاز (%)

η_{el} = الكفاءة الكهربائية لتربين الغاز المستعمل (%)

1.3 تقدير معدلات تدفق غاز الميثان و الطاقة المتولدة الشهرية:

- **الكهرباء المتولدة لسنة 2031م:**

معدل الكلي لانسياب غاز المكب =(2,219,000(m^3/year) ×0.75=1,664,250m^3/year

كل $1m^3$ من الغاز الحر المصاحب =1.109 Nm^3

عليه;

فان المعدل الكلي لتدفق غاز المكب = 211 Nm^3/h

و بما أن الطاقة المكافئة ل **$1m^3$** من غاز المكب = 5 KWh/Nm^3

الكهرباء المتولدة لسنة 2031 =211Nm^3/h ×5 KWh/Nm^3 ×0.41= 432. 5KWh

- الكهرباء المتولدة لسنة 2032م:

معدل الكلي لانسياب غاز المكب =(2,444,000(m^3/year) ×0.75=1,833,000m^3/year

كل **$1m^3$** من الغاز الحر المصاحب =1.109 Nm^3

عليه;

فان المعدل الكلي لتدفق غاز المكب = 232 Nm^3/h

و بما أن الطاقة المكافئة ل **$1m^3$** من غاز المكب = 5 KWh/Nm^3

الكهرباء المتولدة لسنة 2032 =232Nm^3/h ×5 KWh/Nm^3 ×0.41= 475.6KWh

- الكهرباء المتولدة لسنة 2033م:

معدل الكلي لانسياب غاز المكب =(2,396,000(m^3/year) ×0.75=1,797,000m^3/year

كل $1m^3$ من الغاز الحر المصاحب = $1.109\ Nm^3$

عليه;

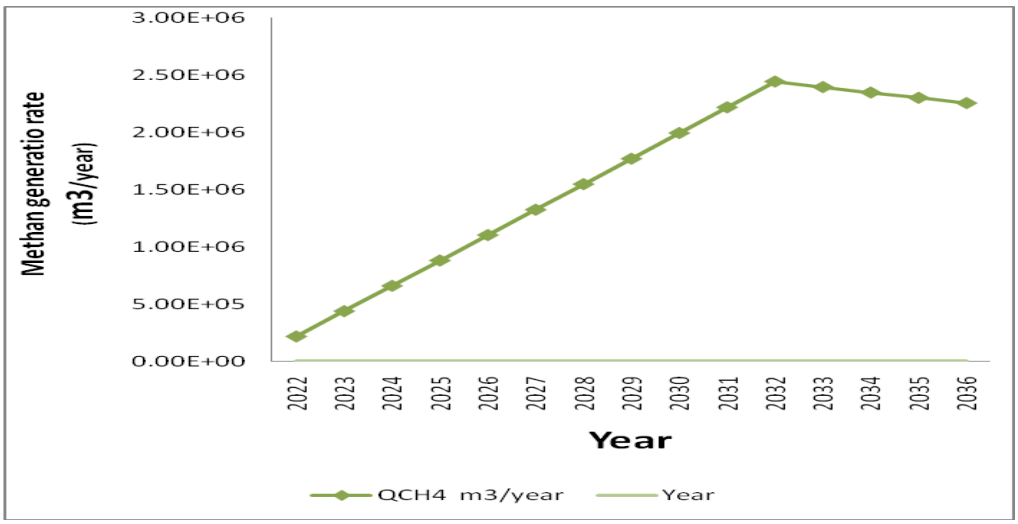
فان المعدل الكلي لتدفق غاز المكب = $227\ Nm^3/h$

و بما أن الطاقة المكافئة ل $1m^3$ من غاز المكب = $5\ KWh/Nm^3$

الكهرباء المتولدة لسنة 2033 = $0.41 \times 5\ KWh/Nm^3 \times 227 Nm^3/h$ = 465.4KWh

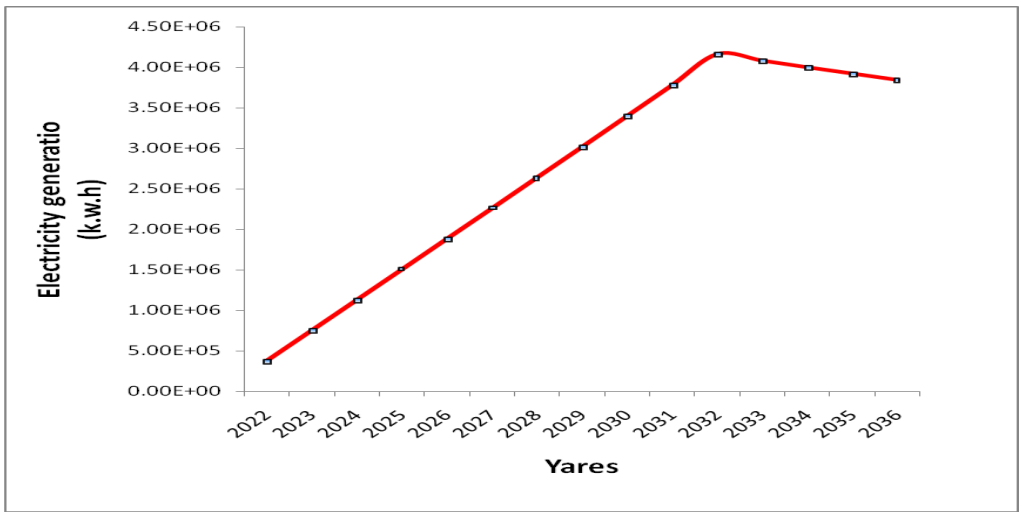
2.3 كمية الطاقة الكلية الناتجة:

في الفترة من (2021–2031) كان هي الفترة من فتح المكب إلى إغلاقه ،حسابات الطاقة الكهربائية الكلية الناتج **من** (H.S.D.L) ،عبر الفترة الممتدة من (2021–2036) و هي فترة تشغيل المشروع المختارة لدراسة حجم غاز الميثان و الطاقة الناتجة،كمية غاز الميثان المتولدة سنويا خلال فترة تشغيل المكب الافتراضية موضحة بالشكل (4)،حيث نلاحظ أن أقصى كمية متولدة لغاز الميثان كانت في السنة الأولى بعد إغلاق المكب و بلغت $2.444E+06\ m^3/year$ لسنة 2032م،ثم بدأت كميات الغاز في التناقص اعتبارا من السنة 2036م.



شكل رقم(4):كمية غاز الميثان المنبعثة سنويا من (H.S.D.L) خلال فترة التشغيل (2022–2036)

كمية الكهرباء المتولدة كانت متوافقة مع أقصى قيمة لانبعاث غاز الميثان و حدثت في سنة (2032م) باستخدام محرك ترددي بكفاءة 41%،بلغت الطاقة المنتجة لذات السنة 4.16 ميقاوات.ساعة، الشكل رقم (5) يوضح كمية الكهرباء المتولدة في المكب خلال الفترة (2021–2036).



رقم(5):كمية الكهرباء المتولدة سنويا من (**H.S.D.L**)خلال فترة التشغيل (2022–2036)

4.3 تخفيضات الغازات الدفيئة 3.4 Electricity generation from landfill gas

تعتبر (**MSW**) ثالث اكبر مصدر من صنع الإنسان لغاز الميثان و يمثل 11% من جميع انبعاثات الميثان العالمية [9] ،مشاريع استعادة الغاز الحيوي في مكبات النفايات تقلل من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري. في حساب غازات الاحتباس الحراري التخفيض عن طريق **LFG** المسترد ،أخذنا في الاعتبار كمية الميثان التي تم تقييدها. تم تقدير حجم ما يعادل تخفيض ثاني أكسيد الكربون بضرب انبعاثات الميثان السنوية بمقدار 25 ، باعتبار أن الميثان لديه حوالي 25 ضعف احتمالية الإحترار العالمي من ثاني أكسيد الكربون[10]. إجمالي تخفيضات الانبعاثات التي يمكن تحقيقها من استرداد **LFG** خلال فترة 15 عامًا ، 2021 حتى 2036 ، كانت241166.75 طن من مكافئ ثاني أكسيد الكربون(**CO_2 eq**).

4. الخاتمة والتوصيات

النمو السكاني المتوقع ،و ما يتبعه من تزايد كميات النفايات الصلبة ، و تغير أنماط الاستهلاك،و طرق إدارة المخلفات الحالية الغير صحية أو مستدامة، إمكانيات مدينة الزاوية فيما يتعلق بإمكانية إنشاء مكبات صحية،قادنا إلى إجراء هذه الدراسة،توليد الكهرباء بهذه الطريقة أيضا يمكننا من تقليل الاعتماد على الكهرباء المتولدة بالمحطات التقليدية و توفير جزء من كميات الوقود الاحفوري و بالتالي العواقب البيئية المترتبة على استخدامه.أيضا توفير فرص استثمارية جديدة و خلق فرص للوظائف هي من مميزات توطين مثل هذه التقنية البيئية. هذه الدراسة هي الأولى في المنطقة ،و هي تؤكد على عدد من التوصيات والإجراءات العملية الواجب إجراؤها لاحقا لتعزيز التصور و النتائج المرجوة لدى صانعي القرار ، ومن هذه التوصيات:

1- إدارة المخلفات الصلبة يجب تضمينها في مفردات التعليم بكليات الهندسة المدنية بجامعات المدينة.

2- إجراء تقييم الجدوى الاقتصادية لإنشاء هذه المشاريع بالمدينة و تقييم المؤشرات الاقتصادية NPV,PBP,IRR,BCR,و إجراء اختبارات الحساسية باستخدام متغيرات:تكلفة الاستثمار ،تكاليف التشغيل و الصيانة،سعر الطاقة،معدل الفائدة.

3- دراسة لتقدير التكلفة المعيارية لسعر وحدة الطاقة المنتجة (LCOE)،بالإضافة لتضمين المنافع البيئية و الاجتماعية كجزء من ذلك.

4- دراسة تفصيلية لتوصيف النفايات الصلبة البلدية لمدينة الزاوية و خصوصيتها و معايير اختيار مواقع المكبات.

المراجـــــع

[1] Rehart, d. **Beneficial use of landfill gas**. Report, University of Central Florida. 1994, USA.

[2] Moftah W; Marković1 D; Moftah O; etc. **Characterization of Household Solid Waste and Management in Tripoli City—Libya**. *Open Journal of Ecology*, 2016, 6, 435-442

[3] Department of Environmental Quality, Wyoming. **municipal solid waste landfill Remediation program** , Act, chapter 17, 2014,USA.

[4] Badi I ; Shetwan A ; Abdulshahed A ; Eltayeb W. **Evaluation of solid waste treatment method in Libya by using the analytic hierarchy process**. *Management and Engineering Brief Journal*, **2019**, 2. Issue 2, pp. 38-54.

[5] Şentürk İ.; Yıldırım B., **A study on estimation of the landfill gas potential from solid waste storage area in Sivas, Turkey**. *Scientific Journal of Mehmet Akif Ersoy University*, **2020**,3:2,63-76.

[6] Abdulvahitoğlu A. ; Yılmaz i. **Projected potential of Landfill gas in Çukurova region**. *International Advanced Researches and Engineering Journal*, **2018**, 02(02), 117-123.

[7] Azis M., Kristanto J. and Purnomo C. **A Techno-Economic Evaluation of Municipal Solid Waste (MSW) Conversion to Energy in Indonesia**. *Sustainability 2021*, 2021, vol. 13.

[8] Surroop D. Mohee R. **power generation from landfill gas, Singapore**. *2011 2nd International Conference on Environmental Engineering and Applications*, 2011, vol.17.

[9] Sharma M.; Choden Y. **Greenhouse gas estimation from municipal solid waste dump site in Roorkee (Uttrakhand), India**. *BluePen Journals Ltd*, 2019, 6, 39-46

[10] Zairi M.; Aydi A.; Ben Dhia H. **Leachate generation and biogas energy recovery in the Jebel Chakir municipal solid waste landfill**, Tunisia. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2014, 16, 141–150

[11] Gal H. Shisi W., Qing L., Paul D. Gottlieb, Fuqing X. and Yebo L. **Cost of organic waste technologies: A case study for New Jersey**, Ohio. Ohio State University, 2015, vol. 3.

[12] الراوي أريج. **تقدير كمية الغاز الحيوي المنبعث من مناطق الطمر الصحي في المدينة العراقية الحالة الدراسية-مدينة الرمادي** . *مجلة المخطط والتنميةٌ*، العدد(27) ، **(2013)** ،11

[13] مخللاتي أ.(2014): **التقييم الاقتصادي البيئي لمشاريع مطامر النفايات البلدية باستخدام منهجية تحليل الكلفة / المنفعة**.*أطروحة ماجستيرٌ*،جامعة حلب،سوريا.

[14] الكشريو ن.،مطر ج .**دراسة جدوى تحويل النفايات البلدية الصلبة كمصدر للطاقة الكهربائية المستقبلية لمدينة طرابلس – ليبيا** .*المجلة الدولية المحكمة للعلوم الهندسية وتقنية المعلومات*، العدد(2)،7 (2021) ،**12**

[15] الفقيه ع. ،حميدة ع.،بادي إ.**دراسة جدوى لتوليد الطاقة من المخلفات البلدية بمدينة مصراته-ليبيا** .*كلية الهندسة*، جامعة مصراته.ليبيا.