



البصمة الكربونية التشغيلية لعمليات جمع ونقل النفايات الصلبة البلدية في مدينة صبراتة: تقدير الانبعاثات
المباشرة لثاني أكسيد الكربون من وقود الديزل
طارق أبو القاسم رحومة ، اخلاص محمد الموشم
المركز الليبي لأبحاث ودراسات المياه والتربة ومكافحة التصحر صبراتة – ليبيا

ekm643788@gmail.com

Operational Carbon Footprint of Municipal Solid Waste Collection and Transport Operations in the City of Sabratha: Estimation of Direct Carbon Dioxide Emissions from Diesel Fuel

Tariq Abulqasim Rahouma, Ikhlas Mohammed Al-Mawsham

Libyan Center for Water, Soil, and Desertification Control Research and Studies – Sabratha, Libya

تاريخ الاستلام: 2026/8/28 تاريخ المراجعة: 2026/8/30 تاريخ القبول: 2026/9/15 تاريخ النشر: 2026/9/28

الملخص

تمثل عمليات جمع ونقل النفايات الصلبة البلدية أحد مصادر انبعاثات غازات الدفيئة المرتبطة بمنظومة إدارة النفايات، ولا سيما نتيجة استهلاك وقود الديزل في مركبات الجمع والنقل. تهدف هذه الدراسة إلى تقدير الانبعاثات المباشرة لثاني أكسيد الكربون الناتجة عن استهلاك وقود الديزل في العمليات التشغيلية المرتبطة بجمع ونقل النفايات الصلبة البلدية في مدينة صبراتة، ليبيا. اعتمدت الدراسة على بيانات تشغيلية ميدانية شملت كمية النفايات المنقولة، وعدد الرحلات اليومية، واستهلاك وقود الديزل، بالإضافة إلى خصائص أسطول النقل. تراوحت كمية النفايات المنقولة تقديرياً بين 120 و150 طن/يوم، مع تنفيذ 15 رحلة يومية مخصصة لجمع ونقل النفايات، ورحلة إضافية لتنظيف الشوارع باستخدام شاحنة سعة 4 أطنان، بينما قُدر إجمالي استهلاك وقود الديزل التشغيلي للأسطول بنحو 300–400 لتر/يوم. تم تقدير انبعاثات ثاني أكسيد الكربون باستخدام منهجية الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC)، وبمعامل انبعاث مشتق للديزل قدره 2.692 كغ/كغ CO₂ لتر. أظهرت النتائج أن الانبعاثات المباشرة المقدرة تراوحت بين 807.7 و1,077.0 كغ/كغ CO₂ يوم، بما يعادل 294.8–393.1 طن/كغ CO₂ سنة عند افتراض 365 يوم تشغيل. ولأغراض تقدير شدة الانبعاثات، تراوحت القيم السيناريوية بين 6.73 و7.18 كغ/كغ CO₂ طن من النفايات، بقيمة وسطية حسابية قدرها 6.98 كغ/كغ CO₂ طن. وتشير النتائج إلى أن استهلاك وقود الديزل يمثل مصدرًا مباشرًا للانبعاثات المرتبطة بالعمليات التشغيلية للأسطول ضمن حدود الدراسة. وتوفر الدراسة خط أساس محلياً أولاً يمكن تطويره من خلال اعتماد سجلات تشغيلية يومية تفصيلية للوقود والمسافات والحمولات لكل مركبة، بما يدعم تحسين دقة تقدير الانبعاثات وتقييم كفاءة عمليات جمع ونقل النفايات في مدينة صبراتة.

الكلمات المفتاحية: النفايات الصلبة البلدية؛ جمع ونقل النفايات؛ انبعاثات ثاني أكسيد الكربون؛ وقود الديزل؛ البصمة الكربونية؛ صبراتة؛ ليبيا.

Abstract

Municipal solid waste (MSW) collection and transportation are sources of greenhouse gas emissions within waste management systems, particularly due to diesel fuel consumption by collection and transport vehicles. This study aims to estimate the direct carbon dioxide (CO₂) emissions resulting from diesel fuel consumption during the operational activities associated with MSW collection and transportation in Sabratha City, Libya. The study was based on field operational data, including the quantity of waste transported, the number of daily trips, diesel fuel consumption, and the characteristics of the transport fleet. The estimated quantity of transported waste ranged from 120 to 150 t/day, with 15 daily trips dedicated to waste collection and transportation and one additional street-cleaning trip using a 4-t truck. Total operational diesel fuel consumption for the fleet was estimated at 300–400 L/day. Direct CO₂ emissions were estimated using the methodology of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), with a derived diesel emission factor of 2.692 kg CO₂/L. The results showed that the estimated direct CO₂ emissions ranged from 807.7 to 1,077.0 kg CO₂/day, equivalent to 294.8–393.1 t CO₂/year, assuming 365 operating days per year. For estimating emission intensity, scenario-based values ranged from 6.73 to 7.18

kg CO₂/t of waste, with a calculated midpoint value of 6.98 kg CO₂/t. These results indicate that diesel fuel consumption represents a direct source of emissions associated with the fleet's operational activities within the defined study boundaries. The study provides an initial local baseline that can be further improved through the implementation of detailed daily operational records for fuel consumption, travel distances, and vehicle loads, thereby supporting more accurate emission estimates and the assessment of MSW collection and transportation efficiency in Sabratha City.

Keywords: Municipal solid waste; waste collection and transportation; carbon dioxide emissions; diesel fuel; operational carbon footprint; Sabratha; Libya.

1. المقدمة:

تُعد إدارة النفايات الصلبة البلدية من أكثر الخدمات الحضرية استهلاكاً للطاقة الأحفورية، ولا سيما في مرحلة النقل إلى المكبات النهائية. ووفقاً للتقرير التقييمي السادس للهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC, 2022)، يُشكل قطاع النقل والنفايات مصدراً رئيساً لغازات الاحتباس الحراري، مما يستدعي بناء قواعد بيانات ميدانية محلية لتصميم سياسات تخفيف فعالة. وتعتمد حسابات البصمة الكربونية للنقل بالمركبات الثقيلة على منهجية الاحتراق المتنقل (Mobile Combustion) المعتمدة في دليل (IPCC, 2006)، والتي تُصنّف انبعاثات الديزل للمركبات المُشغلة ضمن النطاق الأول (Scope 1) لبروتوكول غازات الاحتباس الحراري (GHG Protocol)، بالاستعانة بمعاملات الانبعاث القياسية الصادرة عن وكالة حماية البيئة الأمريكية (US EPA, 2025). تطبيقاً، أظهرت الدراسات الإقليمية والدولية أهمية حساب هذه الانبعاثات؛ حيث بينت دراسة طهران أن البصمة الكربونية لنقل النفايات بلغت 93.57 غرام CO₂e/طن-كم، وترتبط بكمية النفايات ومسافة النقل وكفاءة الوقود (Rouhi et al. 2023). بينما أكدت دراسة فافونيا بسريلانكا أن اعتماد منهجية المستوى الأول (Tier 1) القائمة على بيانات النشاط الفعلي يُمثل أساساً موثقاً للتقدير في البيانات ذات البيانات المحدودة (Kayanan et al. 2024).

وعلى الصعيد المحلي في ليبيا، تُعاني المنظومة من نقص التخطيط وتدني كفاءة النقل وتفاقم تكاليفه التشغيلية (Badi et al., 2018). وتسجل بلدية صبراتة أعلى معدل توليد للنفايات بالمنطقة الغربية بنحو 61,700 طن سنوياً (1.3 كغم/فرد/يوم) وسط نقص في معدات الجمع والنقل (Aldeeb, 2024). وانطلاقاً من هذه المعطيات، تتجلى الحاجة العلمية إلى إجراء تقييم كمي دقيق للأثر البيئي لمنظومة نقل النفايات ببلدية صبراتة؛ حيث تسهم هذه الورقة في سد جانب من الفجوة المعرفية من خلال تقدير الانبعاثات المباشرة لثاني أكسيد الكربون (CO₂) الناتجة عن احتراق وقود الديزل في عمليات جمع ونقل النفايات الصلبة البلدية، ضمن نطاق الانبعاثات المباشرة (Scope 1)، وحساب الشدة الكربونية لكل طن من النفايات المنقولة، بالاعتماد على بيانات تشغيلية ميدانية متاحة لمدينة صبراتة. وتوفر النتائج خط أساس كمياً محلياً يمكن الاستفادة منه في تقييم كفاءة التشغيل ودعم التخطيط البيئي المستدام.

2. مشكلة الدراسة:

تتمثل مشكلة البحث، في حدود ما أمكن الوصول إليه من الأدبيات المنشورة، في عدم توافر دراسة منشورة تقدم تقديراً كمياً مباشراً لانبعاثات ثاني أكسيد الكربون الناتجة عن استهلاك وقود الديزل في عمليات جمع ونقل النفايات الصلبة في بلدية صبراتة. وعلى الرغم من توافر بيانات تشغيلية ميدانية مقدرة تتعلق بعدد المركبات وسعاتها وعدد الرحلات وكميات الوقود المستهلكة، فإن هذه البيانات لم تُوظف، في حدود الأدبيات التي أمكن الوصول إليها، لتقدير تقديراً مباشراً لانبعاثات CO₂ الناتجة عن احتراق الديزل في جمع ونقل النفايات في صبراتة. باستهلاك الديزل في عمليات جمع ونقل النفايات بالبلدية. كما أن اختلاف خصائص المركبات وأعمارها قد يرتبط بتباين كفاءة استهلاك الوقود، إلا أن البيانات المتاحة في الدراسة الحالية لا تسمح بفصل استهلاك الوقود والانبعاثات على مستوى كل مركبة بصورة مستقلة. ومن ثم، تتمثل الحاجة البحثية في إجراء تقدير كمي قائم على بيانات التشغيل الفعلية لتحديد مستوى الانبعاثات المباشرة لثاني أكسيد الكربون الناتجة عن استهلاك الديزل في منظومة جمع ونقل النفايات في صبراتة، وتوفير خط أساس كمي يمكن الاستفادة منه في تقييم وتحسين كفاءة التشغيل البيئي للمنظومة محلياً.

3. أهداف الدراسة:

يسعى هذا البحث إلى تحقيق الأهداف الآتية:

1. توصيف منظومة جمع ونقل النفايات الصلبة البلدية في مدينة صبراتة من حيث حجم النفايات المنقولة، وعدد الرحلات اليومية، واستهلاك وقود الديزل.

2. تقدير الانبعاثات المباشرة لثاني أكسيد الكربون الناتجة عن احتراق وقود الديزل المستخدم في عمليات جمع ونقل النفايات باستخدام منهجية IPCC.
3. تحديد نطاق ومتوسط الانبعاثات اليومية والسببية لثاني أكسيد الكربون المرتبطة باستهلاك الوقود في منظومة الجمع والنقل.
4. توفير خط أساس كمي للانبعاثات المباشرة المرتبطة باستهلاك الوقود يمكن الاستناد إليه في تقييم فرص تحسين الكفاءة التشغيلية وخفض استهلاك الوقود والانبعاثات.

4. الدراسات السابقة:

1. دراسة إسطنبول – تركيا: دراسة إقليمية ذات صلة مباشرة بحث (Korkut et al., 2018) انبعاثات غازات الاحتباس الحراري الناتجة عن جمع النفايات الصلبة البلدية في مدينة إسطنبول، اعتمادًا على استهلاك وقود الديزل وعدد الرحلات ومسافات النقل إلى مرافق التحويل أو الطمر. وقدرت الدراسة إجمالي الانبعاثات بنحو 46.4 ألف طن $\text{CO}_2\text{-eq}$ ، كما أظهرت أهمية تقليل عدد الرحلات ومسافات النقل وتحسين تحميل المركبات. وتتقاطع هذه الدراسة مع البحث الحالي في الاعتماد على بيانات التشغيل الفعلية للرحلات والمسافات واستهلاك الديزل لتقدير الانبعاثات، إلا أن الدراسة الحالية تركز على بلدية أصغر وعلى منظومة النقل إلى موقع التخلص النهائي في صبراتة.

2. دراسة الدمام – المملكة العربية السعودية: دراسة عربية إقليمية درس (Yaman et al., 2019) انبعاثات غازات الاحتباس الحراري الناتجة عن جمع ونقل النفايات في منطقة الدمام، باستخدام استهلاك وقود الديزل الفعلي كأساس لتقدير الانبعاثات، ثم استخدم بيانات التشغيل لبناء نموذج ميكانيكي للتنبؤ باستهلاك الوقود والانبعاثات. وقد بلغ متوسط الانبعاثات بنحو 24,935 طن $\text{CO}_2\text{-eq}$ سنوياً. وتتفق هذه الدراسة مع البحث الحالي بصورة مباشرة في استخدام استهلاك الديزل وبيانات النقل كأساس لحساب الانبعاثات، كما أن البيئة العربية شبه الجافة تجعلها مرجعاً إقليمياً مناسباً للمقارنة مع حالة صبراتة. ويختلف البحث الحالي عنها في أنه يركز على الحساب الفعلي للبصمة الكربونية لمنظومة النقل في بلدية صبراتة دون بناء نموذج تنبؤي أو نمذجة انتشار جوي.

3. دراسة طهران – إيران: الأقرب منهجياً إلى الدراسة الحالية قمت (Rouhi et al., 2023) بنموذجاً لحساب البصمة الكربونية لنقل النفايات البلدية في طهران، بالاعتماد على إرشادات IPCC وبيانات الوقود والنفايات، مع اعتبار كمية النفايات المنقولة والمسافة والوقود المستهلك من أهم المتغيرات المؤثرة. وقدرت الانبعاثات المرتبطة بالنقل بنحو 8.47 ألف طن $\text{CO}_2\text{-eq}$ سنوياً، وبصمة كربونية قدرها $93.57 \text{ g CO}_2\text{-eq/t}\cdot\text{km}$. وتُعد هذه الدراسة الأقرب إلى البحث الحالي من حيث الهدف والمنهج الأساسي، إذ تعتمد على ربط بيانات النشاط الفعلية بعوامل الانبعاث لتقدير الأثر الكربوني للنقل. ويختلف البحث الحالي عنها في نطاق الدراسة وطبيعة الأسطول والبيانات التشغيلية المحلية المتاحة في صبراتة.

4. دراسة قيصري – تركيا: دراسة دولية تعتمد LCA استخدم (Taşkın and Demir, 2020) منهجية تقييم دورة الحياة LCA لدراسة الآثار البيئية واستهلاك الطاقة لسيناريوهات جمع ونقل النفايات البلدية في محافظة قيصري. وخلصت الدراسة إلى أن إنشاء محطات تحويل يمكن أن يقلل الأثر البيئي واستهلاك الطاقة المرتبطتين بالنقل. وتفيد هذه الدراسة البحث الحالي في بيان تأثير مسافات النقل وتصميم منظومة الجمع والتحويل على الأداء البيئي، إلا أن منهجيتها تختلف عن الدراسة الحالية؛ إذ تعتمد على LCA وسيناريوهات بديلة، بينما تركز الدراسة الحالية على حساب الانبعاثات الناتجة عن التشغيل الفعلي لأسطول النقل باستخدام بيانات استهلاك الوقود. ويتضح من الدراسات السابقة وجود اتجاه بحثي واضح نحو ربط استهلاك الوقود، ومسافات النقل، وعدد الرحلات، وكمية النفايات المنقولة بالانبعاثات الناتجة عن عمليات جمع ونقل النفايات.

وتُعد دراستا (Yaman et al., 2019) في الدمام (Rouhi et al., 2023) في طهران الأقرب إلى الدراسة الحالية، نظرًا لاعتمادهما على بيانات الوقود الفعلية وحساب الانبعاثات المرتبطة بالنقل. أما دراسة Taşkın and Demir (2020) فتقدم منظوراً مختلفاً قائماً على LCA، يفيد في فهم أثر خيارات تصميم منظومة النقل دون أن يتطابق مع نطاق الدراسة الحالية. وبناءً على ذلك، تتميز الدراسة الحالية بتطبيق هذا الإطار على حالة ميدانية في بلدية صبراتة، لبيبا، باستخدام بيانات التشغيل واستهلاك الوقود المتاحة محلياً لتقدير البصمة الكربونية لعمليات جمع ونقل النفايات.

5. أهمية البحث:

1. الأهمية العلمية: تسهم الدراسة في توفير تقييم كمي لانبعاثات التشغيلية المباشرة لثاني أكسيد الكربون الناتجة عن استهلاك الديزل الناتجة عن عمليات جمع ونقل النفايات الصلبة في مدينة صبراتة، بالاعتماد على منهجيات ومعايير دولية معتمدة لحساب انبعاثات غازات الاحتباس الحراري.

البصمة الكربونية التشغيلية لعمليات جمع ونقل النفايات الصلبة البلدية في مدينة صبراتة: تقدير الانبعاثات

2. الأهمية التطبيقية: توفر الدراسة خط أساس كمياً يمكن الاستفادة منه في تقييم الأداء البيئي لعمليات جمع ونقل النفايات، وتحديد أثر استهلاك الوقود وكفاءة الرحلات على مستوى الانبعاثات الناتجة عن المنظومة الحالية.

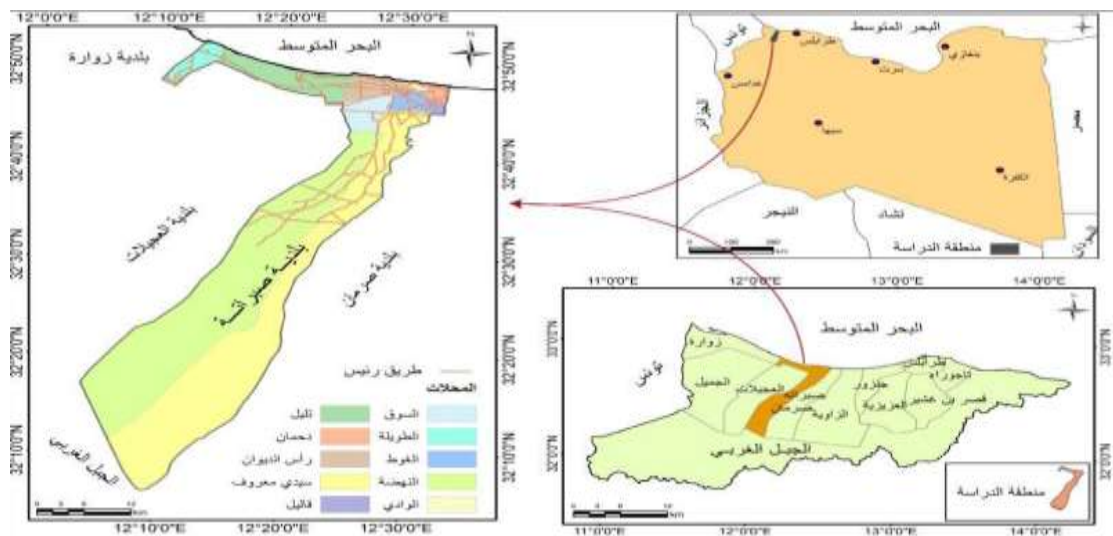
3. الأهمية المستقبلية: تقدم الدراسة بيانات ميدانية يمكن أن تدعم التخطيط لتحسين كفاءة عمليات النقل وترشيد استهلاك الوقود، كما توفر أساساً للمقارنة مع دراسات مماثلة في بلديات ليبية ومناطق أخرى.

6. حدود الدراسة

اقتصرت الدراسة الحالية على تقدير الانبعاثات المباشرة لثاني أكسيد الكربون (CO_2) الناتجة عن احتراق وقود الديزل المستخدم في العمليات التشغيلية لأسطول جمع ونقل النفايات الصلبة البلدية في مدينة صبراتة. وعلى الرغم من أن احتراق وقود الديزل في المركبات ينتج أيضاً كميات من غازات دفيئة أخرى، مثل الميثان (CH_4) وأكسيد النيتروز (N_2O)، فإن هذه الغازات لم تُحسب بصورة مستقلة في الدراسة الحالية؛ إذ تركز الدراسة على تقدير CO_2 الناتج مباشرة عن استهلاك الوقود باستخدام بيانات التشغيل المتاحة وعامل الانبعاث المعتمد للديزل. وبسبب إدراج CH_4 و N_2O إجراء حسابات إضافية باستخدام عوامل انبعاث مناسبة لفئات المركبات وتقنيات التشغيل، ثم تحويل الانبعاثات إلى مكافئ ثاني أكسيد الكربون (CO_2 -eq) وفق قيم القدرة على إحداث الاحترار العالمي المعتمدة. لذلك لا تمثل النتائج الحالية إجمالي انبعاثات غازات الدفيئة الناتجة عن الأسطول، وإنما تمثل تقديراً للانبعاثات التشغيلية المباشرة لثاني أكسيد الكربون ضمن حدود الدراسة. كما لم تشمل الدراسة الانبعاثات غير المباشرة المرتبطة بإنتاج وتكرير ونقل الوقود، أو تصنيع المركبات والمعدات وصيانتها، أو الانبعاثات الناتجة عن التخلص النهائي من النفايات أو عمليات المعالجة وإعادة التدوير.

7. منطقة الدراسة والبيانات التشغيلية:

تقع بلدية صبراتة على الشريط الساحلي الشمالي الغربي للليبيا، ضمن إقليم السهل الجفاري، عند إحداثيات جغرافية تقارب خط عرض 32.7934° شمالاً وخط طول 12.4885° شرقاً، وتبعد نحو 70 كيلومتراً غرب العاصمة طرابلس، وتبلغ المساحة الإدارية للبلدية حوالي 478.8 كيلومتر مربع بارتفاع يبلغ نحو 10 إلى 12 متراً عن مستوى سطح البحر. وتتكون البلدية تنظيمياً من عدة محلات إدارية تشمل السوق، الطويلة، النهضة، دحمان، القليل، الغوط، راس الديوان، وسيدي معروف (الوحشي، 2015). وتتميز صبراتة بكثافة سكانية ونشاط تجاري وحضري متزايد يجعلها تسجل أعلى معدل في توليد النفايات الصلبة بالمنطقة الغربية (Aldeeb, 2024). وتُنتقل النفايات الصلبة البلدية المجمعة من مختلف مناطق وقطاعات مدينة صبراتة بواسطة أسطول الشركة العامة للخدمات والنظافة إلى المكب النهائي بمنطقة الإذاعة، الواقع جنوب/جنوب غرب المدينة، وتبلغ المسافة التقريبية من مركز المدينة إلى موقع التخلص النهائي نحو 33 كم. ويقع المكب خارج نطاق المناطق الحضرية المكتظة، حيث تُفرغ شاحنات وضغطات جمع النفايات حمولاتها اليومية في الموقع المخصص تشغيلياً لاستقبال النفايات وتغطيتها. (الشركة العامة للخدمات والنظافة – صبراتة، 2025).



شكل (1) خريطة منطقة الدراسة: المصدر (الوحشي، 2015)

البصمة الكربونية التشغيلية لعمليات جمع ونقل النفايات الصلبة البلدية في مدينة صبراتة: تقدير الانبعاثات

يجمع الجدول (1) أدناه كافة البيانات الميدانية التشغيلية الأولية الخاصة بمنظومة نقل النفايات الصلبة في بلدية صبراتة، كما وردت دون أي تعديل أو افتراض إضافي، وتُشكل هذه البيانات القاعدة الأساسية التي سيبنى عليها حساب البصمة الكربونية في الأجزاء اللاحقة من هذا البحث.

جدول (1). البيانات التشغيلية الميدانية لمنظومة جمع ونقل النفايات الصلبة في بلدية صبراتة		
البند / المعطى التشغيلي	القيمة الميدانية	وحدة القياس
الكمية اليومية المقدرة للنفايات المنقولة إلى المكب النهائي	120–150	طن/يوم
عدد رحلات نقل النفايات اليومية	15	رحلة/يوم
عدد رحلات تنظيف الشوارع اليومية	1	رحلة/يوم
سعة مركبة تنظيف الشوارع	4	طن/رحلة
إجمالي استهلاك وقود الديزل اليومي للأسطول	300–400	لتر/يوم
نوع الوقود المستخدم في مركبات جمع ونقل النفايات	ديزل	—
نطاق الانبعاثات الناتجة عن احتراق الوقود	Scope 1	—

المصدر : إعداد الباحثة بالاعتماد على البيانات الميدانية والمقابلة مع الجهة المسؤولة عن جمع ونقل النفايات في بلدية صبراتة.

ملاحظة : تمثل الكمية اليومية للنفايات واستهلاك الوقود قيمياً ميدانية مقدرة ضمن نطاقات تشغيلية وفق البيانات التي تم الحصول عليها من منظومة التشغيل. ويشير عدد الرحلات (15 رحلة/يوم) إلى رحلات نقل النفايات، بينما عولجت رحلة تنظيف الشوارع كنشاط تشغيلي منفصل. ويشير تصنيف Scope 1 إلى الانبعاثات المباشرة الناتجة عن احتراق الوقود في المركبات، وليس إلى وحدة قياس.

جدول (2) الخصائص التشغيلية لمركبات جمع ونقل النفايات المستخدمة في الدراسة					
نوع المركبة	نوع الوقود	سعة خزان الوقود	السعة التحميلية	عدد المركبات	سنة الصنع
ضاغطة Hyundai	ديزل	100 لتر/مركبة	4 طن/رحلة	2	2023
ضاغطة Mitsubishi	ديزل	100 لتر/مركبة	4 طن/رحلة	2	2009
شاحنة Iveco	ديزل	200 لتر/مركبة	8 طن/رحلة	2	—

المصدر : إعداد الباحثة بالاعتماد على البيانات الميدانية والمقابلة مع الجهة المسؤولة عن جمع ونقل النفايات في بلدية صبراتة.



صورة (1) الشاحنات والضاحطات التشغيلية التابعة للشركة العامة للخدمات والنظافة المستخدمة في عمليات جمع ونقل النفايات الصلبة البلدية في مدينة صبراتة.

المصدر (التصوير والتوثيق الميداني للباحثة أثناء دراسة الأسطول التشغيلي). (2026)

8. منهجية الدراسة:

8.1 منهجية حساب الانبعاثات

اعتمدت الدراسة في تقدير الانبعاثات الكربونية الناتجة عن عمليات جمع ونقل النفايات على منهجية متوافقة مع مبادئ GHG Protocol الخاصة بانبعاثات الاحتراق المتنقل، إلى جانب معاملات الانبعاث الافتراضية الواردة في إرشادات IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. وتُعد مركبات جمع ونقل النفايات مصادر احتراق متنقلة، وتُصنف انبعاثاتها المباشرة ضمن النطاق الأول (Scope 1) عندما تكون المركبات مملوكة للجهة المشغلة أو خاضعة لسيطرتها التشغيلية.

استند تقدير الانبعاثات في الدراسة الحالية إلى كمية وقود الديزل المستهلكة فعليًا على مستوى الأسطول التشغيلي، باعتبارها متغير النشاط الأساسي في الحساب. ويُعد هذا النهج مناسبًا لبيانات الدراسة، حيث توفرت تقديرات يومية لاستهلاك الديزل، في حين لم تتوفر سجلات تفصيلية منتظمة لاستهلاك الوقود لكل مركبة على حدة أو للمسافات المقطوعة لكل رحلة. ويوصي GHG Protocol بجمع بيانات استهلاك الوقود والمسافة وخصائص المركبات عند توافرها، إلا أن بيانات الوقود تمثل أساسًا مقبولًا للتقدير عند محدودية البيانات التفصيلية.

وبناءً على البيانات الميدانية، يتكون الأسطول محل الدراسة من ست مركبات، تشمل أربع ضاحطات بسعة 4 طن للمركبة، وشاحنتي إيفيكو بسعة 8 طن للمركبة. ويبلغ عدد رحلات نقل النفايات 15 رحلة يوميًا، إضافة إلى رحلة واحدة مخصصة لتنظيف الشوارع، ليصبح إجمالي الرحلات التشغيلية 16 رحلة يوميًا. وقد تراوحت كمية النفايات المنقولة بين 120 و150 طنًا/يوم، بينما تراوح استهلاك وقود الديزل للأسطول بين 300 و400 لتر/يوم.

تم استخدام معامل انبعاث الديزل الافتراضي الوارد في إرشادات IPCC ، مع استخدام القيمة الحرارية الصافية للديزل البالغة 43.0 TJ/Gg ومعامل انبعاث ثاني أكسيد الكربون البالغ 74,100 kg CO₂/TJ. وترد قيمة 43.0 TJ/Gg للـ Gas/Diesel Oil في الجدول 1.2 من إرشادات IPCC ، بينما يرد معامل 74,100 kg CO₂/TJ للديزل ضمن معاملات الانبعاث الافتراضية للوقود.

ويقتصر حد النظام في هذه الدراسة على الانبعاثات المباشرة الناتجة عن احتراق وقود الديزل أثناء التشغيل اليومي لأسطول جمع ونقل النفايات وتنظيف الشوارع. ولا يشمل التقييم الحالي الانبعاثات الناتجة عن إنتاج الوقود، أو تكريره ونقله، أو تصنيع المركبات وصيانتها، أو الانبعاثات الناتجة من موقع التخلص النهائي للنفايات. وعليه، فإن النتائج تمثل البصمة الكربونية التشغيلية المباشرة لمرحلة النقل والجمع، وليست تقييمًا شاملاً لدورة حياة إدارة النفايات.

ولأغراض التحليل، تم التمييز بين الرحلات المخصصة لجمع ونقل النفايات، والبالغ عددها 15 رحلة/يوم، وإجمالي الرحلات التشغيلية البالغ 16 رحلة/يوم، حيث تشمل الرحلة الإضافية نشاط تنظيف الشوارع باستخدام شاحنة سعة 4 أطنان. وتُعد كمية النفايات المنقولة خلال هذه الرحلة جزءًا من إجمالي كمية النفايات اليومية المقدرة بنحو 120-150 طنًا/يوم، وليست كمية إضافية إليها. وبناءً على اختلاف طبيعة هذه الرحلة عن رحلات الجمع والنقل الاعتيادية، لم تُعامل كرحلة جمع مستقلة عند حساب مؤشر الانبعاث لكل رحلة نقل.

8.2 المعادلات الرياضية وحساب الانبعاثات

فُدرت انبعاثات ثاني أكسيد الكربون (CO₂) الناتجة عن احتراق وقود الديزل المستخدم في عمليات جمع ونقل النفايات وفق منهجية المستوى الأول (Tier 1) الواردة في إرشادات الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC). وتعتمد هذه المنهجية على كمية الوقود المستهلك ومحتواه من الطاقة ومعامل انبعاث ثاني أكسيد الكربون الخاص بالوقود. وعند عدم توفر بيانات وقود أو معاملات انبعاث خاصة بمنطقة الدراسة، يمكن استخدام القيم الافتراضية الواردة في إرشادات IPCC. وحُسب محتوى الطاقة اليومي للديزل المستهلك وفق المعادلة الآتية:

$$EC_d = \frac{FC_d \times \rho \times NCV}{10^6}$$

حيث يمثل FC_d استهلاك الديزل اليومي (L/day) ، ρ كثافة الديزل (kg/L) ، و NCV القيمة الحرارية الصافية للوقود (TJ/Gg) ، و EC_d محتوى الطاقة اليومي للوقود (TJ/day) ، بينما يمثل 10^6 معامل تحويل الكيلوغرام إلى جيجاغرام.

بعد ذلك، حُسبت انبعاثات ثاني أكسيد الكربون اليومية وفق:

$$EC_{CO_2,d} = EC_d \times EF_{CO_2}$$

حيث يمثل $EC_{CO_2,d}$ الانبعاثات اليومية من ثاني أكسيد الكربون (kg CO₂/day) ، و EF_{CO_2} معامل انبعاث ثاني أكسيد الكربون للديزل (kg CO₂/TJ). واعتمدت الدراسة قيمة افتراضية قدرها 43.0 TJ/Gg للقيمة الحرارية الصافية للـ Gas/Diesel Oil ، وقيمة 74,100 kg CO₂/TJ لمعامل الانبعاث، وفق إرشادات IPCC لعام 2006. كما تشير إرشادات الاحتراق المتنقل إلى أن معامل CO₂ الافتراضي يعكس افتراض أكسدة كاملة للكربون.

وللتعبير عن الانبعاثات على أساس سنوي، حُسبت الانبعاثات السنوية وفق:

$$EC_{CO_2,y} = \frac{EC_{CO_2,d} \times 365}{1000}$$

حيث يمثل $EC_{CO_2,y}$ إجمالي الانبعاثات السنوية (t CO₂/year) ، بافتراض استمرار النشاط التشغيلي بالمعدل اليومي نفسه طوال أيام السنة.

كما حُسبت شدة الانبعاثات بالنسبة إلى كمية النفايات المنقولة يوميًا وفق:

$$I_{CO_2} = \frac{EC_{CO_2,d}}{W_d}$$

حيث يمثل I_{CO_2} شدة الانبعاثات (kg CO₂/t waste) ، و W_d كمية النفايات المنقولة يوميًا (t/day).

ولغرض التحقق من الاتساق بين الوحدات، اشتُق معامل انبعاث حتمي للديزل من القيم السابقة وفق:

$$EF_L = \frac{\rho \times NCV \times EF_{CO_2}}{10^6}$$

وقد بلغ هذا المعامل نحو 2.69 kg CO₂/L عند استخدام كثافة قدرها 0.845 kg/L. ويُعامل هذا الرقم على أنه معامل مشتق من معاملات IPCC وليس كمعامل افتراضي مستقل صادر عن IPCC.

وتُعرض جميع المتغيرات ووحدات القياس المستخدمة في الحسابات في الجدول (3)، بينما تُعرض القيم المرجعية المستخدمة في الحسابات في الجدول (4).

البصمة الكربونية التشغيلية لعمليات جمع ونقل النفايات الصلبة البلدية في مدينة صبراتة: تقدير الانبعاثات

جدول (3). المتغيرات والرموز المستخدمة في حساب الانبعاثات الكربونية

الرمز	الوحدة	المتغير	مصدر القيمة
FC_d	L/day	استهلاك وقود الديزل اليومي	البيانات التشغيلية الميدانية
ρ	kg/L	كثافة وقود الديزل	قيمة مرجعية مستخدمة للتحويل الحجمي إلى كتلي
NCV	TJ/Gg	القيمة الحرارية الصافية للديزل	IPCC (2006)
EC_d	TJ/day	محتوى الطاقة اليومي للوقود المستهلك	قيمة محسوبة
EF_{CO_2}	kg CO ₂ /TJ	معامل انبعاث ثاني أكسيد الكربون للديزل	IPCC (2006)
$EC_{CO_2,d}$	kg CO ₂ /day	انبعاثات ثاني أكسيد الكربون اليومية	قيمة محسوبة
$EC_{CO_2,y}$	t CO ₂ /year	انبعاثات ثاني أكسيد الكربون السنوية	قيمة محسوبة
W_d	t/day	كمية النفايات المنقولة يومياً	البيانات التشغيلية الميدانية
I_{CO_2}	kg CO ₂ /t waste	شدة الانبعاثات الكربونية	قيمة محسوبة
E_{trip}	kg CO ₂ /trip	متوسط انبعاثات ثاني أكسيد الكربون لكل رحلة	قيمة محسوبة
EF_L	kg CO ₂ /L	معامل الانبعاث الحجمي المشتق للديزل	قيمة مشتقة حسابياً

ملاحظة: تُحدد قيم ρ ، و NCV ، و EF_{CO_2} ، و OF وفق معاملات ومراجع IPCC المعتمدة في الدراسة، بينما تُستمد FC_d ، و W_d ، و N من البيانات التشغيلية الميدانية لمنظومة جمع ونقل النفايات في منطقة الدراسة

جدول (4): معاملات الانبعاث والقيم المرجعية المعتمدة لوقود الديزل (احتراق متفعل)

الرمز	الوحدة	القيمة المستخدمة	المعامل	المصدر/أساس القيمة
ρ	kg/L	0.845	كثافة وقود الديزل	قيمة مرجعية للتحويل من حجم الوقود إلى كتلته
NCV	TJ/Gg	43.0	القيمة الحرارية الصافية للديزل (Gas/Diesel Oil)	IPCC (2006), Vol. 2, Ch. 1, Table 1.2
EF_{CO_2}	kg CO ₂ /TJ	74,100	معامل انبعاث ثاني أكسيد الكربون	IPCC (2006), Vol. 2, Ch. 1, Table 1.4
OF	—	1.00	معامل أكسدة الكربون	افتراض الأكسدة الكاملة المستخدم مع معامل CO ₂ في منهجية IPCC
EF_L	kg CO ₂ /L	≈2.69	معامل الانبعاث الحجمي المشتق للديزل	محسوب من $\rho \times NCV \times EF_{CO_2} / 10^6$

9. النتائج والمناقشة

جدول (5). نتائج حساب البصمة الكربونية التشغيلية لعمليات جمع ونقل النفايات في بلدية صبراتة

الانبعاثات السنوية (t CO ₂ /year)	الانبعاثات اليومية (kg CO ₂ /day)	كمية النفايات (t/day)	استهلاك الديزل (L/day)	شدة الانبعاثات (kg CO ₂ /t)
294.8	807.7	120	300	6.73
344.0	942.3	135	350	6.98
393.1	1,077.0	150	400	7.18

ملاحظة: حُسبت الانبعاثات اليومية باستخدام معامل انبعاث الديزل البالغ 2.692 kg CO₂/L، وحُسبت الانبعاثات السنوية على أساس 365 يوم تشغيل. وتمثل قيم شدة الانبعاثات سيناريوهات حسابية تربط القيم الدنيا والوسطية والعليا المقدرة لاستهلاك الوقود بالقيم المقابلة المستخدمة لكمية النفايات، ولا تعني بالضرورة أن هذه القيم تم قياسها بصورة مقترنة في الأيام نفسها. ويشمل استهلاك الوقود اليومي المقدّر إجمالي الاستهلاك التشغيلي للأسطول، بما في ذلك رحلة تنظيف الشوارع، التي تنقل جزءاً من إجمالي كمية النفايات اليومية.

9.1 تقدير الانبعاثات المباشرة لثاني أكسيد الكربون

أظهرت البيانات التشغيلية الميدانية أن استهلاك وقود الديزل للأسطول يتراوح تقديرياً بين 300 و 400 لتر/يوم، بينما تتراوح كمية النفايات المنقولة بين 120 و 150 طن/يوم. وباستخدام معامل الانبعاث المحسوب للديزل والبالغ 2.692 kg CO₂/L، تراوحت الانبعاثات المباشرة المقدرة لثاني أكسيد الكربون بين 807.7

و $1,077.0 \text{ kg CO}_2/\text{day}$ ، بزيادة متدرجة مع ارتفاع مستوى استهلاك الوقود. وعند تحويل هذه القيم إلى أساس سنوي بافتراض 365 يوم تشغيل، تراوحت الانبعاثات بين 294.8 و $393.1 \text{ t CO}_2/\text{year}$ ، في حين بلغت القيمة الوسطية المحسوبة عند استهلاك 350 L/day نحو $942.3 \text{ kg CO}_2/\text{day}$ ، أي ما يعادل $344.0 \text{ t CO}_2/\text{year}$.

ولأغراض تقدير شدة الانبعاثات بالنسبة إلى كمية النفايات، استُخدمت ثلاثة سيناريوهات حسابية تمثل القيم الدنيا والوسطية والعليا لنطاقي استهلاك الوقود وكمية النفايات. ووفق هذا الأسلوب، تراوحت شدة الانبعاثات المحسوبة بين 6.73 و $7.18 \text{ kg CO}_2/\text{t}$ ، مع قيمة وسطية قدرها $6.98 \text{ kg CO}_2/\text{t}$. ويجب تفسير هذه القيم باعتبارها نتائج سيناريوية مبنية على نطاقات البيانات التشغيلية المتاحة، وليس باعتبارها مدىً مرصوداً يومياً لشدة الانبعاثات، لعدم توافر سجلات يومية مقترنة توضح كمية الوقود المستهلكة وكمية النفايات المنقولة في اليوم نفسه.

9.2 مناقشة نتائج الانبعاثات

تشير النتائج إلى وجود علاقة حسابية مباشرة بين كمية وقود الديزل المستهلكة والانبعاثات المباشرة لثاني أكسيد الكربون، إذ إن معامل الانبعاث المستخدم ثابت لكل وحدة من الوقود، وبالتالي فإن ارتفاع استهلاك الديزل من 300 إلى 400 لتر/يوم يؤدي حسابياً إلى ارتفاع الانبعاثات من 807.7 إلى $1,077.0 \text{ kg CO}_2/\text{day}$. ولا تعني هذه العلاقة أن تغير استهلاك الوقود ناتج عن عامل تشغيلي واحد بعينه، إذ يمكن أن يتأثر الاستهلاك الفعلي بعدد الرحلات، والمسافات المقطوعة، وكمية الحمولة، وحالة المركبات، وظروف الطريق، وطريقة التشغيل، وهي عوامل لم تُقاس بصورة مستقلة في الدراسة الحالية.

وتُظهر القيمة الوسطية المقدرة، البالغة نحو $942.3 \text{ kg CO}_2/\text{day}$ ، أهمية استهلاك وقود الديزل باعتباره مصدر الانبعاث المباشر الذي تم قياسه ضمن حدود الدراسة. إلا أن هذه القيمة لا ينبغي تفسيرها على أنها متوسط ميداني محسوب من سلسلة قياسات يومية، وإنما تمثل القيمة الناتجة عن استخدام 350 L/day كنقطة وسط حسابية لنطاق الاستهلاك المقدّر ميدانياً.

أما شدة الانبعاثات المقدرة، والتي تراوحت سيناريوياً بين 6.73 و $7.18 \text{ kg CO}_2/\text{t}$ ، فتشير إلى مستوى الانبعاث المرتبط بكمية النفايات عند استخدام القيم المتناظرة ضمن نطاقات البيانات المتاحة. ومع ذلك، فإن هذا المؤشر يتأثر بعدم وجود سجلات يومية مقترنة للوقود والنفايات؛ ولذلك لا يمكن اعتباره مؤشراً تجريبياً ثابتاً لأداء منظومة النقل، بل ينبغي التعامل معه باعتباره تقديرًا أولياً قابلاً للتحسين عند توفر سجلات يومية تفصيلية.

وتكتسب هذه الملاحظة أهمية عند مقارنة النتائج بالدراسات السابقة، إذ تختلف الدراسات المنشورة في حدود النظام، ونوع غازات الدفيئة المحسوبة، وطريقة التعبير عن الانبعاثات. فالدراسة الحالية تقتصر على الانبعاثات المباشرة لثاني أكسيد الكربون الناتجة عن احتراق الديزل، في حين تستخدم بعض الدراسات السابقة وحدة $\text{kg CO}_2\text{-eq}/\text{t}$ ، والتي قد تشمل غازات دفيئة متعددة وحدوداً تشغيلية أوسع. ولذلك لا تُعد المقارنة العددية المباشرة بين هذه المؤشرات مقارنة متكافئة تماماً، وإنما يمكن استخدامها بصورة وصفية لإبراز اختلاف نطاقات التقييم والمنهجيات.

وتشير النتائج كذلك إلى أهمية تحسين جودة البيانات التشغيلية المحلية بوصفها خطوة أساسية لتطوير تقديرات أكثر دقة للانبعاثات. فتوفر سجل يومي لكل مركبة يتضمن كمية الوقود المستهلكة، والمسافة المقطوعة، وعدد الرحلات، وكمية النفايات المنقولة، ونوع النشاط التشغيلي، سيسمح مستقبلاً بربط استهلاك الوقود فعلياً بكمية النفايات المنقولة وحساب شدة الانبعاثات على أساس بيانات مرصودة بدلاً من السيناريوهات التقديرية المستخدمة في الدراسة الحالية.

9.3 مقارنة النتائج بالدراسات السابقة

تتفق نتائج الدراسة الحالية مع الاتجاه العام الذي أظهرته الدراسات السابقة بشأن ارتباط استهلاك الوقود في عمليات جمع ونقل النفايات بالانبعاثات غازات الدفيئة. إلا أن المقارنة الكمية المباشرة تتطلب الحذر بسبب اختلاف حدود النظام ومؤشرات القياس. فقد اعتمدت الدراسة الحالية على الانبعاثات المباشرة لثاني أكسيد الكربون الناتجة عن احتراق وقود الديزل، في حين استخدمت بعض الدراسات السابقة مكافئ ثاني أكسيد الكربون ($\text{CO}_2\text{-eq}$) ، بما قد يشمل أكثر من غاز دفيئة واحد.

كما تختلف الدراسات من حيث المتغيرات التشغيلية المستخدمة في الحساب؛ إذ تعتمد بعض الدراسات على المسافة المقطوعة، واستهلاك الوقود، وعدد الرحلات، وكمية النفايات، بينما تقتصر البيانات المتاحة في الدراسة الحالية بصورة أساسية على تقدير استهلاك الوقود اليومي، وكمية النفايات المنقولة، وعدد الرحلات. لذلك فإن قيمة المقارنة الأساسية لا تتمثل في ترتيب مستويات الانبعاثات بين المدن، وإنما في إظهار أثر اختلاف حدود النظام ونوعية البيانات التشغيلية على نتائج تقدير الانبعاثات.

وتوفر النتائج الحالية، رغم اعتماد جزء من البيانات على تقديرات تشغيلية، خط أساس محلي أولي يمكن تطويره مستقبلاً من خلال جمع بيانات يومية تفصيلية عن استهلاك الوقود والمسافات والحمولات لكل مركبة، بما يسمح بإجراء تقييم أكثر دقة لكفاءة عمليات جمع ونقل النفايات وانبعاثاتها.

10. الخلاصة

خلصت الدراسة إلى أن العمليات التشغيلية لأسطول جمع ونقل النفايات الصلبة البلدية في مدينة صبراتة ترتبط بانبعاثات مباشرة من ثاني أكسيد الكربون ناتجة عن احتراق وقود الديزل. واستناداً إلى نطاق استهلاك الوقود التشغيلي المقدر ميدانياً، والبالغ 300-400 لتر/يوم، تراوحت الانبعاثات المقدرة بين 807.7 و1,077.0 كغ CO₂/يوم، أي ما يعادل 294.8-393.1 طن/كغ CO₂ سنة عند افتراض استمرار التشغيل على مدار 365 يوماً. كما أظهرت الحسابات السيناريوية أن شدة الانبعاثات، عند ربط القيم الدنيا والوسطية والعليا المقدرة لاستهلاك الوقود وكميات النفايات، تراوحت بين 6.73 و7.18 كغ CO₂/طن، بقيمة وسطية حسابية بلغت 6.98 كغ CO₂/طن. وتُعد هذه القيم تقديرات سيناريوية وليست متوسطات مرصودة يومية، نظراً إلى عدم توافر سجلات يومية مقترنة توضح استهلاك الوقود وكمية النفايات المنقولة في اليوم نفسه.

وتؤكد النتائج أهمية استهلاك الديزل بوصفه مصدر الانبعاث المباشر الذي تم تقييمه ضمن الحدود التشغيلية للدراسة، مع ضرورة مراعاة أن كمية الوقود المتاحة تمثل إجمالي الاستهلاك التشغيلي للأسطول، بما في ذلك الرحلة الإضافية لتنظيف الشوارع، والتي تنقل جزءاً من كمية النفايات اليومية. وعليه، لا ينبغي تفسير النتائج باعتبارها تقديراً منفصلاً للانبعاثات الخاصة بكل رحلة أو مركبة.

وبصورة عامة، تقدم الدراسة تقديراً كمياً أولياً للانبعاثات المباشرة لثاني أكسيد الكربون المرتبطة بالتشغيل الفعلي لأسطول النفايات في مدينة صبراتة، وتوفر أساساً محلياً يمكن البناء عليه في الدراسات المستقبلية. وتتمثل أهم خطوة لتحسين دقة التقدير في إنشاء نظام منظم لتسجيل استهلاك الوقود والمسافات المقطوعة وعدد الرحلات وكمية النفايات ونوع النشاط لكل مركبة بصورة يومية، بما يسمح مستقبلاً بحساب مؤشرات الانبعاثات اعتماداً على بيانات مقترنة ومرصودة ميدانياً بدلاً من نطاقات التقدير الحالية.

11. التوصيات

استناداً إلى النتائج الميدانية والتقديرات الكمية للانبعاثات الناتجة عن استهلاك وقود الديزل في منظومة جمع ونقل النفايات الصلبة في مدينة صبراتة، توصي الدراسة بما يلي:

1. إنشاء نظام يومي موحد لتسجيل استهلاك الوقود لكل مركبة، يتضمن كمية الديزل المستهلكة، وعدد الرحلات، والمسافة المقطوعة، وساعات التشغيل، بما يتيح تحسين دقة تقدير الانبعاثات ومتابعتها دورياً.
2. تسجيل الوزن الفعلي للنفايات في كل رحلة وربطه باستهلاك الوقود، بدلاً من الاعتماد على السعة التصميمية للمركبات، بما يسمح بحساب مؤشرات تشغيلية دقيقة مثل استهلاك الوقود (لتر/طن) والانبعاثات (كغ CO₂/طن نفايات).
3. مراجعة مسارات الجمع والنقل وتحسين تخطيط الرحلات بهدف تقليل المسافات غير الضرورية والرحلات غير المحملة وأوقات الانتظار، مع تقييم أثر أي تعديل في المسارات على استهلاك الوقود والانبعاثات.
4. تنفيذ برنامج منظم لصيانة المركبات ومراقبة كفاءتها التشغيلية، مع مقارنة استهلاك الوقود بين المركبات وأنواعها وتحديد المركبات ذات الاستهلاك المرتفع لاتخاذ الإجراءات الفنية المناسبة.
5. فصل نشاط تنظيف الشوارع عن نشاط جمع ونقل النفايات في السجلات والحسابات التشغيلية، بحيث يتم توثيق الوقود والرحلات والحمولات لكل نشاط بصورة مستقلة، مما يحسن دقة تحديد مساهمة كل نشاط في إجمالي الانبعاثات.
6. اعتماد مؤشرات دورية للبصمة الكربونية وإنشاء قاعدة بيانات محلية للمنظومة، تشمل استهلاك الوقود، وأوزان النفايات، وعدد الرحلات، والمسافات المقطوعة، ونوع المركبات، بهدف متابعة الأداء السنوي وتقييم أثر إجراءات خفض استهلاك الوقود والانبعاثات.

1- المراجع العربية:

1. الوحيشي، محمد حسن. (2015). تحديد الخصائص الجغرافية والمكانية لبلديات الساحل الغربي الليبي. مجلة العلوم الإنسانية والتطبيقية، جامعة الزاوية، 12(2)، 45-58.
2. شركة الخدمات العامة والنظافة - صبراتة. (2025). التقارير التشغيلية الميدانية لأسطول جمع ونقل النفايات ببلدية صبراتة (تقرير تشغيلي غير منشور). مكتب الإدارة والتشغيل، صبراتة، ليبيا.

2. المراجع الانجليزية

1. Aldeeb, W. (2024). The current status of solid waste handling in western region of Libya. *University of Zawia Journal of Engineering Sciences and Technology*, 2(1), 23–30. <https://doi.org/10.26629/uzjest.2024.03>
2. Badi, I., Stević, Ž., Abdulshahed, A., & Erceg, Ž. (2018). Optimization of municipal waste management in Libya. *Modern Problems of Russian Transport Complex*, 8(1), 12–19. <https://doi.org/10.18503/2222-9396-2018-8-1-12-19>
3. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Volume 2: Energy*. Institute for Global Environmental Strategies. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>
4. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate change 2022: Mitigation of climate change: Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157926>
5. Kayanan, S., Basnayake, B. F. A., & Ariyawansa, R. T. K. (2024). Strategies to mitigate greenhouse gas (GHG) emissions from the solid waste management sector: A case study of Vavuniya, Sri Lanka. *Scientifica*, 2024, 7709721. <https://doi.org/10.1155/2024/7709721>
6. Korkut, N. E., Yaman, C., Küçükağa, Y., Jaunich, M. K., & Demir, İ. (2018). Greenhouse gas contribution of municipal solid waste collection: A case study in the city of Istanbul, Turkey. *Waste Management & Research*, 36(2), 131–139. <https://doi.org/10.1177/0734242X17744656>
7. Rouhi, K., Shafiepour Motlagh, M., & Dalir, F. (2023). Developing a carbon footprint model and environmental impact analysis of municipal solid waste transportation: A case study of Tehran, Iran. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 73(12), 890–901. <https://doi.org/10.1080/10962247.2023.2271424>
8. Taşkın, A., & Demir, N. (2020). Life cycle environmental and energy impact assessment of sustainable urban municipal solid waste collection and transportation strategies. *Sustainable Cities and Society*, 61, 102339. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102339>
9. U.S. Environmental Protection Agency. (2025). *GHG emission factors hub*. <https://www.epa.gov/climateleadership/ghg-emission-factors-hub>
10. Yaman, C., Anil, I., Jaunich, M. K., Blaisi, N. I., Alagha, O., Yaman, A. B., & Günday, S. T. (2019). Investigation and modelling of greenhouse gas emissions resulting from waste collection and transport activities. *Waste Management & Research*, 37(12), 1282–1290. <https://doi.org/10.1177/0734242X19882482>