منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك)
ORGANIZATION OF ARAB PETROLEUM EXPORTING COUNTRIES (OAPEC)

THE OXFORD INSTITUTE FOR ENERGY STUDIES
A RECOGNIZED INDEPENDENT CENTRE OF THE UNIVERSITY OF OXFORD

UNIVERSITY OF OXFORD

نظرة على ورقة بحثية حول الاستخدام المناخي الأمثل للنفايات:

مقارنة نهج تحويل النفايات إلى طاقة مع احتجاز وتخزين الكربون، مقابل إنتاج وقود طيران مستدام مشتق من النفايات، في المملكة المتحدة

On the climate-optimal use of waste: Comparing Energy-from-Waste with CCS (WECCS) with Waste-derived Sustainable Aviation Fuels (SAF) in the UK Context

إعداد : د. ياسر محمد بغدادي

في ضوء متابعة منظمة الأقطار العربية المصدرة للبترول (أوابك) لمستجدات أسواق الطاقة العالمية، وتطورات سياسات التحول الطاقي، واتساع نطاق الالتزامات المناخية الهادفة إلى تحقيق الحياد الكربوني بحلول منتصف القرن، تتزايد أهمية تقييم الخيارات التقنية والاقتصادية المتاحة لإدارة الانبعاثات وتقليل البصمة الكربونية في القطاعات المختلفة، بما في ذلك إدارة النفايات الصلبة وإنتاج الوقود منخفض الكربون. وشهدت السنوات الأخيرة اهتماما متزايداً من قبل الحكومات والمؤسسات البحثية بإعادة النظر في دور **النفايات الصلبة البلدية** باعتبارها مصدر للكربون يمكن الاستفادة منه في مسارات متنافسة لخفض الانبعاثات الكربونية ، مثل مسار تحويل النفايات الصلبة إلى طاقة مع احتجاز وتخزين الكربون، ومسار إنتاج وقود الطيران المستدام.

وفي هذا السياق، تبرز الورقة البحثية الصادرة عن معهد أوكسفورد لدراسات الطاقة **(OIES)** في نوفمبر 2025 بعنوان: الاستخدام المناخي الأمثل للنفايات: مقارنة نهج تحويل النفايات إلى طاقة مع احتجاز وتخزين الكربون **(WECCS)** ، مقابل إنتاج وقود طيران مستدام **(SAF)** مشتق من النفايات، في المملكة المتحدة[1]"، والتي تقدم تحليل فني لمسارات محتملة لاستغلال النفايات الصلبة البلدية المتبقية **Residual MSW**، والإجابة عن سؤال يتعلق بأفضلية تخصيص هذا المورد المحدود في المسارات المختلفة.

تعتمد الورقة منهجية تقييم دورة حياة عواقبية[2]، مع احتساب الانبعاثات المباشرة ، الانبعاثات المتجنبة وإزالة الكربون الحيوي[3]. ومن خلال الموازنة بين هذه العناصر الثلاثة، تصل

---

[1] On the climate-optimal use of waste: Comparing Energy-from-Waste with CCS (WECCS) with Waste-derived Sustainable Aviation Fuels (SAF) in the UK Context

[2] يقصد بتقييم دورة الحياة العواقبية **Consequential Life Cycle Assessment (Consequential LCA)** منهجية تحليلية متقدمة تهدف إلى تقدير الأثر المناخي الحقيقي الناتج عن **قرار** معين، وليس فقط حساب الانبعاثات المباشرة للنظام القائم. وتقوم هذه المنهجية على دراسة **العواقب المترتبة على تغيير مسار استخدام مورد محدود**، مثل توجيه النفايات إلى إنتاج وقود طيران مستدام أو إلى محطات تحويل النفايات إلى طاقة مع احتجاز الكربون. وتشمل هذه العواقب احتساب الانبعاثات التي يتم تجنبها في المسارات البديلة، مثل استبدال الكهرباء المنتجة من الشبكة، أو تجنب انبعاثات المدافن، أو الاستغناء عن إنتاج مواد بكر كالحديد والبلاستيك. وبذلك يوفر التقييم العواقبي صورة أكثر دقة لجدوى الخيارات المناخية، لأنه لا يكتفي بوصف الانبعاثات الحالية، بل يوضح **ما الذي سيتغير فعلياً على مستوى النظام** عندما يُتخذ قرار جديد بشأن تخصيص النفايات

[3] **الانبعاثات المباشرة** تشمل ما يصدر عن المنشآت من غازات دفيئة خلال جمع النفايات ومعالجتها وتشغيل الوحدات الصناعية، مثل احتراق الوقود واستهلاك الكهرباء والمواد الكيميائية. اما **الانبعاثات المتجنبة** فهي الانبعاثات التي كان من الممكن ان تحدث في نظام بديل، لكنها لا تقع بفضل تطبيق المسار الجديد، مثل تجنب انبعاثات المدافن الصحية، او استبدال كهرباء الشبكة عالية الكربون، او تقليل الحاجة لإنتاج بلاستيك ومعادن بكر. بينما **ازالة الكربون الحيوي** فيكون عندما يتم التقاط ثاني اكسيد الكربون الناتج عن الكربون الحيوي في النفايات وتخزينه جيولوجيا بشكل دائم، ما يحول هذا المسار الى اداة لإزالة الكربون من الغلاف الجوي وليس فقط خفض الانبعاثات

المقال صدر في الموقع الإلكتروني لمعهد أكسفورد لدراسات الطاقة وقد تم ترجمته إلى اللغة العربية بإذن من المعهد

الدراسة الى ان بعض المسارات، مثل تحويل النفايات الى طاقة مع احتجاز الكربون، تحقق اثرا مناخيا سالبا واضحا لكل طن من النفايات مقارنة بالبديل المنافس الأخر.

تكمن اهمية الورقة في تسليط الضوء على التزاحم المتزايد بين سياسات دعم مشاريع التقاط وتخزين الكربون، وسياسات تعزيز استخدام وقود الطيران المستدام، في ظل محدودية الموارد الكربونية المتاحة في النفايات الصلبة المتبقية. وتبرز الدراسة الحاجة الى إطار سياساتي متكامل[4] يوازن بين هذه الاستخدامات ويراعي توجيه النفايات نحو المسارات التي تحقق اعلى فائدة مناخية ممكنة لكل طن، بدلا من تبني سياسات متفرقة قد تؤدي الى نتائج اقل كفاءة او حتى متعارضة. كما تقدم الورقة مجموعة من النتائج التي تساعد في تقييم المبادرات الوطنية والاقليمية المرتبطة بقطاع النفايات والطاقة والوقود منخفض الكربون.

1. الخلفية التحليلية للورقة

تأتي الورقة البحثية لتسد فجوة معرفية مهمة في تقييم الدور المناخي للنفايات الصلبة البلدية المتبقية في تحقيق أهداف الحياد الكربوني. فاستراتيجيات التحول الطاقي في المملكة المتحدة – كما في العديد من الدول – تشهد توسعاً متسارعاً في مشاريع احتجاز وتخزين الكربون **(CCUS)**، إلى جانب تنامي السياسات الداعمة لإنتاج وقود الطيران المستدام**(SAF)**. ورغم أن كلا المسارين يهدفان إلى خفض الانبعاثات، إلا أنهما يتنافسان على مورد محدود من النفايات الصلبة البلدية المتبقية **Residual MSW** وبالأخص محتواها من الكربون الحيوي .وتشير الورقة إلى غياب إطار تنظيمي واضح داخل الاتحاد الأوروبي والمملكة المتحدة لتوزيع هذا المورد بين الاستخدامات المناخية المتنافسة، وهو ما قد يؤدي – في حال سوء التوجيه – إلى إهدار مواد ذات قيمة مناخية عالية. وتستعرض الورقة الاستخدام الأمثل للنفايات المتبقية بعد الفرز وإعادة التدوير، مع تركيز خاص على الكربون الحيوي المستخلص من المكونات العضوية مثل الورق وبقايا الطعام ومخلفات الحدائق. تسعى الورقة إلى الإجابة عن سؤال محوري: **أي المسارين يحقق أكبر فائدة مناخية لكل طن من النفايات المتبقية.**

[4] يشير مفهوم **الإطار السياساتي المتكامل** الى وجود مجموعة من السياسات والتشريعات والاليات التنظيمية التي يتم تصميمها وتنفيذها بشكل منسق ومتجانس بين الجهات المعنية، بحيث تعمل جميعها ضمن رؤية واحدة وتتجنب التعارض او ازدواجية الجهود. ويهدف هذا الإطار الى ضمان تحقيق الاهداف المشتركة بكفاءة اعلى، من خلال ربط مسارات التخطيط والتنفيذ بين قطاعات الطاقة والبيئة والبلديات والصناعة والنقل، وتحديد الادوار والمحفزات وآليات المتابعة بصورة واضحة. ويسهم هذا النهج في توجيه الموارد نحو الخيارات الاكثر جدوى، ومنع التنافس غير المقصود بين القطاعات على نفس المورد، وتعزيز القدرة على تحقيق نتائج مناخية وتنموية متوازنة ومستدامة.

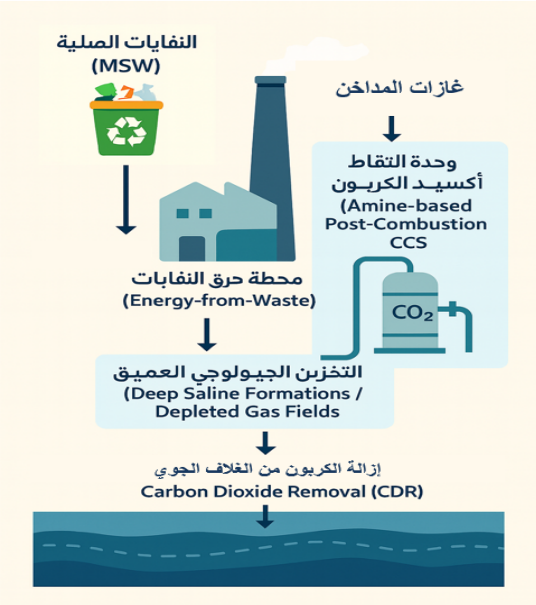
2. هدف الورقة البحثية

تهدف الورقة البحثية إلى **إجراء تقييم كمي مقارن** للمسارين ، بغرض دعم صانعي القرار في المملكة المتحدة عند صياغة سياسات تخصيص النفايات المتبقية، وذلك **من خلال تقدير ومقارنة الاثر المناخي الصافي** [5] **(Global Warming Potential – GWP100)** لكل من:

- مسار تحويل النفايات إلى طاقة مع احتجاز وتخزين الكربون **EfW+CCS**،
- مسار تحويل النفايات إلى وقود طيران مستدام **MSW-to-SAF** .

1. مسار تحويل النفايات إلى طاقة مع احتجاز وتخزين الكربون (EfW with CCS[6])

حيث تعمل محطات تحويل النفايات الصلبة البلدية إلى طاقة وفق معايير وتشريعات بيئية صارمة تضمن التحكم في الملوثات ومعالجة غازات المداخن بكفاءة عالية. وبعد حرق النفايات المتبقية، يتم سحب غازات المداخن وتمريرها عبر وحدات متقدمة لالتقاط ثاني أكسيد الكربون باستخدام تقنيات الامتصاص الكيميائي. ويُضغط ثاني أكسيد الكربون الملتقط ويُنقل عبر شبكات الأنابيب إلى مكامن جيولوجية عميقة "مثل الطبقات الملحية أو المكامن المستنفدة تحت قاع البحر"، حيث يُخزن بصورة دائمة وآمنة. ونظراً لأن جزء كبير من الكربون الموجود في النفايات ذو أصل حيوي (مصدره الورق وبقايا الطعام والكتلة العضوية)، فإن التقاطه ودفنه تحت الأرض يمثل **إزالة حقيقية ودائمة للكربون من الغلاف الجوي** ، مما يجعل هذا المسار من أهم تقنيات الوصول إلى الحياد الكربوني وإنتاج "انبعاثات سالبة".



2. مسار إنتاج وقود طيران مستدام من النفايات الصلبة البلدية (MSW-to-SAF)

---

[5] تقدير ومقارنة الأثر المناخي الصافي لكل مسار تقني يُعد خطوة أساسية في تقييم جدواه البيئية، إذ يعتمد هذا النهج على حساب **إمكانية الاحترار العالمي (GWP100)** التي تمثل مقياساً موحّداً لتحويل مختلف غازات الدفيئة إلى **مكافئ ثاني أكسيد الكربون** خلال فترة مئة عام. ويشمل ذلك حصر الانبعاثات المباشرة وغير المباشرة المرتبطة بدورة الحياة الكاملة لكل خيار تقني، إلى جانب أي عمليات لاحتجاز الكربون أو تجنّب الانبعاثات تسهم في خفض الأثر الإجمالي. ومن خلال هذا المؤشر، يمكن مقارنة البدائل المختلفة – مثل تحويل النفايات إلى وقود، أو حرقها مع التقاط الكربون، أو معالجتها حيوياً – وفق أثرها الحقيقي على المناخ، بما يتيح تحديد المسار الأكثر كفاءة في تقليل الانبعاثات وتحقيق أهداف الحياد الكربوني.

[6] **Energy from Waste**

يمثل إنتاج وقود الطيران المستدام من النفايات مساراً حيوياً محتمل لخفض انبعاثات قطاع الطيران، الذي يعد من أكثر القطاعات صعوبة في إزالة الكربون . وتبدأ العملية بمعالجة النفايات المتبقية بعد الفرز، حيث يُستخلص الجزء العضوي ويتم إخضاعه للتحلل الإنزيمي بهدف تحويل المواد السيليلوزية والعضوية إلى سكريات قابلة للتخمير. بعد ذلك تستخدم عمليات التخمر الميكروبي لإنتاج الإيثانول الحيوي، وهو المركب الوسيط الذي تنتقل من خلاله الكتلة الحيوية في مسار التحويل إلى وقود طيران.

يخضع الإيثانول المنتج لسلسلة من العمليات الصناعية ضمن مسار تحويل الإيثانول الحيوي إلى وقود الطيران **Alcohol-to-Jet** ، بهدف الحصول على هيدروكربونات خفيفة ومتوسطة مطابقة للمواصفات الدولية لوقود الطائرات. ويتميز الوقود الناتج بإمكانية خلطه مباشرة مع وقود الطائرات التقليدي **Jet A** دون الحاجة إلى أي تعديلات في المحركات أو البنية التحتية القائمة.

يسهم هذا المسار في تقليل الانبعاثات من خلال إعادة تدوير الكربون الحيوي الموجود في النفايات ، مما يجعله خياراً مهماً ضمن حلول التحول الطاقي. ومع ذلك، يبقى هذا المسار معتمداً بشكل كبير على كفاءة عمليات التحويل وحجم الانبعاثات المتجنبة، مقارنةً بالمسار الأخر لتحويل النفايات إلى طاقة مع التقاط وتخزين الكربون، والتي توفر في كثير من الحالات فائدة مناخية أكبر نتيجة تحقيق إزالة دائمة لثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي.

3. المنهجية

اعتمدت الورقة البحثية منهجية تقييم دورة الحياة العواقبي **(Consequential LCA)** المتوافقة مع معايير ISO 14040 وISO 14044، باعتبار ان الهدف ليس مجرد قياس الانبعاثات المرتبطة بنظام قائم، بل تحليل الاثر الناتج عن تغيير مسار استخدام النفايات بين مسار تحويل النفايات الى طاقة مع احتجاز وتخزين الكربون، ومسار انتاج وقود الطيران المستدام، او العكس. ويتطلب هذا النهج ادخال مفهوم الانبعاثات المتجنبة **(Avoided Burdens)** الناتجة عن استبدال الكهرباء او الوقود الاحفوري بمنتجات او خدمات يقدمها المسار الجديد.

كما اعتمدت الدراسة حدود نظام من نوع "المهد إلى البوابة**(Cradle-to-gate)** "، مع توسعة في نطاق التحليل بحيث تشمل جميع المراحل ذات الصلة بالتقييم المناخي. ويعني ذلك أن التحليل لم يقتصر على المراحل المباشرة لإنتاج المنتج، بل امتد ليغطي الأنشطة المكملة والمؤثرة في

البصمة الكربونية، بما يتيح فهماً أكثر شمولاً ودقة للأثر المناخي الإجمالي.. ويتضمن ذلك مدخلات النفايات كما ترد عند بوابة المصنع دون تحميلها اي اعباء بيئية سابقة، ثم عمليات الفرز واسترجاع المواد القابلة للتدوير، تليها مراحل التحويل المختلفة سواء عبر الحرق مع احتجاز وتخزين الكربون، او من خلال مسار انتاج الايثانول وتحويله لاحقا الى وقود طيران مستدام، اضافة الى مسارات انتاج الكهرباء او الحرارة او الوقود. ويتم ضمن هذه الحدود احتساب الانبعاثات المتجنبة الناتجة عن استبدال المنتجات التقليدية بنواتج المسار الجديد، بما يعكس الاثر المناخي الصافي لكل خيار تكنولوجي. ولغرض توصيف الاثر المناخي بدقة، استخدمت الدراسة نموذج **ReCiPe** [7]باعتباره من النماذج المعيارية الاكثر انتشارا في مجال تقييم دورة الحياة.

4. النتائج الرئيسية للدراسة

في ضوء نتائج دراسات تحليل دورة الحياة، يتضح ان مسار تحويل النفايات الى طاقة مع احتجاز وتخزين الكربون (**EfW+CCS**) يعد المسار الاكثر تحقيقا لفائدة مناخية صافية وملموسة، اذ يحقق اثرا سالبا كبيرا على صعيد انبعاثات مكافئ ثاني اكسيد الكربون. ففي السيناريو الاساس الذي تحتسب فيه فوائد تجنب الدفن في المدافن، يصل الاثر المناخي الصافي الى نحو - 1338 كيلوغرام من مكافئ ثاني اكسيد الكربون لكل طن نفايات، وهو ناتج عن الجمع بين ازالة الكربون الحيوي وتجنب انبعاثات المدفن واستبدال الكهرباء والمعادن والبلاستيك البكر. وحتى في سيناريو أكثر تحفظا يستبعد ارصدة التجنب كافة تقريبا، يبقى النظام ذا أثر صافي - 973 كيلوغرام من مكافئ ثاني اكسيد الكربون لكل طن، مما يعكس قوة هذا المسار من حيث تحقيق ازالة كربونية صافية. ويأتي الجزء الاكبر من الفائدة المناخية من ازالة الكربون الحيوي الناتجة عن التقاط وتخزين ثاني أكسيد الكربون من غازات المداخن، والتي تمثل نحو - 697 كيلوغرام من مكافئ ثاني اكسيد الكربون لكل طن، اي ما يعادل 52 - 72 % من اجمالي الفائدة. كما تسهم ارصدة اضافية مثل استبدال كهرباء الشبكة واستبدال انتاج المعادن والبلاستيك وتجنب انبعاثات المدفن في تعزيز هذا الاداء المناخي.

[7] يعد نموذج ReCiPe من اكثر منهجيات تقييم الاثر البيئي استخداما في دراسات تحليل دورة الحياة، حيث يوفر اطارا معياريا لتحويل التدفقات البيئية . مثل انبعاثات الغازات والملوثات واستهلاك الموارد. الى مؤشرات كمية قابلة للمقارنة. ويجمع النموذج بين مستويين من التحليل؛ مستوى منتصف الطريق الذي يركز على فئات التأثير المباشر مثل الاحتباس الحراري وتلوث الهواء وتحميل الموارد، ومستوى نهاية الطريق الذي يقيس الاثر النهائي على صحة الانسان وجودة النظم البيئية والموارد الاقتصادية. ويكتسب ReCiPe اهمية خاصة في دراسات النفايات والطاقة لكونه معتمدا على نطاق واسع في الادبيات العلمية والصناعية، ويوفر منهجية متسقة تسمح بمقارنة نتائج مسارات تقنية مختلفة، مما يعزز موثوقية التقييم المناخي ويجعل نتائجه قابلة للمواءمة مع الدراسات الدولية الاخرى.

اما مسار تحويل النفايات الصلبة البلدية الى وقود طيران مستدام **(MSW-to-SAF)**، فيظهر فوائد مناخية اقل مقارنة بالمسار الاول، لكنه يظل مسارا منخفض الانبعاثات. ففي السيناريو الذي تحتسب فيه ارصدة تجنب الطمر، يبلغ الاثر المناخي الصافي حوالي - 700 كيلوغرام من مكافئ ثاني اكسيد الكربون لكل طن نفايات، بينما ينخفض هذا الاثر في السيناريو الاكثر تحفظا الذي يستبعد رصيد تجنب المدفن الى نحو سالب 334 كيلوغرام من مكافئ ثاني اكسيد الكربون لكل طن. ولا يسهم هذا المسار في تحقيق ازالة كربونية صافية، اذ يعاد إطلاق الكربون الحيوي والاحفوري في مرحلة احتراق الوقود داخل محركات الطائرة. وتأتي الفائدة المناخية بشكل رئيسي من استبدال انتاج البلاستيك والمعادن البكر، خصوصا **PET** ، الى جانب استبدال حرارة وكهرباء تعتمد على الغاز الطبيعي، واستبدال جزء محدود من وقود الطائرات التقليدي، فضلا عن تجنب الطمر في سيناريو الاساس. ومع ذلك، يتحمل هذا المسار اعباء اضافية نتيجة استهلاك المواد الكيميائية والانزيمات والطاقة في مراحل المعالجة الحيوية وتحويل الايثانول الى وقود طيران، اضافة الى الاعباء المرتبطة بمعالجة الفضلات وانبعاثات عمليات اعادة التدوير.

وتبرز هذه المقارنة الفروق الجوهرية بين المسارين: فمسار **تحويل النفايات إلى طاقة مع احتجاز وتخزين الكربون** يقدم فائدة مناخية عميقة مدفوعة بإزالة الكربون الحيوي، بينما يحقق مسار تحويل النفايات الصلبة البلدية الى وقود طيران مستدام فوائد اقل تعتمد في جوهرها على استبدال منتجات وخدمات عالية الكربون.

5. المناقشة والتحليل المقارن

- توضح نتائج التقييم الكمي أن مسار تحويل النفايات إلى طاقة مع احتجاز وتخزين الكربون يتفوق بوضوح من حيث الفائدة المناخية مقارنة بمسار تحويل النفايات الصلبة البلدية إلى وقود طيران مستدام، وذلك في جميع السيناريوهات التي تمت دراستها. فحتى في أكثر الفرضيات تحفظا، وعند استبعاد معظم الأرصدة المتجنبة، يظل هذا المسار ذا انبعاثات صافية سالبة بفضل قدرته على إزالة الكربون الحيوي من الغلاف الجوي وإحداث خفض دائم في الانبعاثات من خلال آلية الإزالة الكربونية **Carbon Dioxide Removal (CDR)**، وهو ما يحقق فائدة مناخية عالية وثابتة يصعب الوصول إليها عبر البديل الأخر. ويعود هذا التفوق إلى اختلاف جوهري في طبيعة الفائدة المناخية بين المسارين، إذ يعتمد مسار النفايات إلى طاقة مع احتجاز الكربون على التقاط جزء كبير من

الكربون الحيوي وتخزينه جيولوجيا بشكل دائم، مما يوفر رصيدا مناخيا طويل الاجل يمكن الاستفادة منه في معادلة انبعاثات القطاعات التي يصعب خفضها. وبهذا يقدم المسار فائدة مناخية عميقة ومستقرة وذات تأثير ممتد مقارنة بالمسار الأخر التي تظل فوائدها مرتبطة فقط بإحلال الوقود أو خفض الانبعاثات التشغيلية دون تحقيق إزالة كربونية دائمة.

- على الجانب الآخر، يعتمد مسار تحويل النفايات إلى وقود طيران مستدام على استبدال منتجات تقليدية مثل وقود الطائرات **Jet A** والكهرباء والحرارة والمواد البكر، دون أن يحقق إزالة صافية للكربون. فالفائدة المناخية هنا تأتي أساسا من خفض الانبعاثات البديلة أو تأجيلها، وهي فوائد أقل استدامة ولا توفر أثرا تراكميا طويل الاجل كالذي يقدمه مسار **CDR** .

6. الاستنتاجات والتوصيات الرئيسية

- كلا المسارين يحقق انبعاثات صافية سالبة لكل طن من النفايات وفق النماذج الحالية، الا أن مسار تحويل النفايات إلى طاقة مع احتجاز وتخزين الكربون يقدم فائدة مناخية أكبر ودرجة ثبات أعلى عبر مختلف السيناريوهات. ويعود ذلك إلى قدرته على تحقيق ازالة دائمة للكربون الحيوي من الغلاف الجوي، مما يجعله اداة استراتيجية في مسار الحياد الكربوني، خصوصا في سيناريوهات تجاوز الانبعاثات ثم العودة **(Overshoot)**، وهي المسارات التي ترتفع فيها الانبعاثات أو درجات الحرارة العالمية مؤقتا فوق المستوى المستهدف قبل خفضها لاحقا، وتتطلب بالتالي تحقيق ازالات كربونية صافية كبيرة لتعويض التراكم الزائد في الانبعاثات والعودة إلى المسار المناخي المطلوب.
- في المقابل، يشكل مسار تحويل النفايات الصلبة البلدية الى وقود طيران مستدام خيارا مهما لقطاع الطيران، نظرا لقدرته على احلال جزء من الوقود الاحفوري المستخدم حاليا، ودوره في تحسين استرجاع المواد القابلة للتدوير مثل البلاستيك والمعادن. كما يمتاز هذا المسار بتوافقه مع البنية التحتية الحالية لوقود الطيران، وانسجامه مع الاليات والسياسات الدولية ذات الصلة، بما في ذلك نظام كورسيا لتعويض وخفض الكربون في الطيران الدولي **(CORSIA)** . ومع ذلك، تبقى فوائده المناخية محدودة زمنيا مقارنة بمسار تحويل النفايات الى طاقة مع احتجاز وتخزين الكربون ، اذ يعتمد في الاساس على خفض الانبعاثات عبر الاحلال، من دون ان يحقق ازالة كربون صافية من الغلاف الجوي، وهو ما يجعل اثره المناخي اقل استمرارية على المدى الطويل.

- وتؤكد الدراسة ضرورة اعادة النظر في هرم ادارة النفايات التقليدي في ظل اهداف الحياد الكربوني، بحيث لا يقتصر التقييم على اعادة التدوير او استرجاع الطاقة، بل يشمل ايضا قيمة الازالة الدائمة للكربون. كما تشدد على اهمية تصميم سياسات منسقة تربط بين برامج احتجاز الكربون وتخزينه، وسياسات وقود الطيران المستدام، واستراتيجيات ادارة النفايات، والتعامل مع النفايات المتبقية بوصفها "متجها كربونيا" يجب تخصيصه وفقا لمعيار الفائدة المناخية القصوى لكل طن.
- تحذر الدراسة من ان غياب إطار متكامل لتخصيص النفايات بين الاستخدامات المناخية المختلفة قد يقود الى توجيه النفايات نحو مسارات "جذابة سياسيا" لكنها ليست الافضل مناخيا، مما قد يقوض الجدوى المناخية الشاملة لاستثمارات **مشروعات احتجاز وتخزين واستخدام الكربون أو مشروعات إنتاج وقود الطيران المستدام**، ويقلل من كفاءة الاستفادة من النفايات كمورد استراتيجي في مسار الوصول الى الحياد الكربوني.

ختاماً، وفي ضوء النتائج التي توصلت اليها الورقة البحثية، يتبين ان الاستنتاجات المطروحة تحمل دلالات مهمة للدول الاعضاء في اوابك، رغم ان الدراسة تنطلق من سياق المملكة المتحدة. فالتوسع الملحوظ في مشاريع تحويل النفايات الى طاقة، وتنامي مبادرات وقود الطيران المستدام، وتزايد الاهتمام بتقنيات احتجاز وتخزين الكربون في الصناعات البترولية والبتروكيماوية، يجعل من هذه النتائج مرجعا يمكن الاستفادة منه في توجيه السياسات المستقبلية وتعزيز كفاءة مسارات خفض الانبعاثات في المنطقة.

وتطرح الدراسة عددا من فرص التوظيف الممكنة لهذه النتائج على مستوى الدول الاعضاء. اولا، يمكن التعامل مع النفايات المتبقية باعتبارها موردا كربونيا استراتيجيا ضمن خطط الطاقة والمناخ، وليس مجرد عبء بيئي، الامر الذي يتيح مجالا اوسع لتخصيص هذا المورد وفق الاستخدام الذي يحقق الفائدة المناخية الاكبر. ثانيا، تدعو النتائج الى تبني منهجيات تقييم دورة الحياة العواقبية عند مقارنة بدائل استغلال النفايات، بحيث تسبق هذه التحليلات اتخاذ قرارات الدعم او التوسع في مسار معين، مما يضمن توجيه الموارد الى الخيارات ذات الاثر المناخي الاعلى.

كما تؤكد الورقة ضرورة اعطاء اولوية للمسارات التي توفر ازالة كربون حقيقية ودائمة، مثل مشاريع تحويل النفايات الى طاقة مع احتجاز وتخزين الكربون، خصوصا في المدن الكبرى والمناطق الصناعية الساحلية التي تمتلك امكانات ملائمة للتخزين الجيولوجي. وتبرز الدراسة كذلك اهمية بناء تنسيق مؤسسي اوسع بين وزارات الطاقة والبترول، والبيئة والبلديات، وهيئات الطيران المدني، بهدف تحديد الاستخدام الانسب للنفايات المتبقية بين مسارات ازالة الكربون وتلبية الطلب المتوقع على الوقود منخفض الكربون في قطاع الطيران.

ويسهم اعتماد هذا النهج التكاملي في تجنب التنافس بين القطاعات على المورد نفسه، ويضمن تعظيم الجدوى المناخية لكل طن من النفايات، بما يدعم انتقالا أكثر توازنا نحو اقتصاد منخفض الكربون في الدول الاعضاء في اوابك.