مقال مراجعة موضوع

السياسات المناخية وفاعليتها في خفض الانبعاثات الكربونية: مراجعة نقدية للأدلة التجريبية ومحددات الأثر

Climate Policies and Their Effectiveness in Reducing Carbon Emissions: A Critical Review of Empirical Evidence and Determinants of Impact

م.د. مصطفى حسن عواد
جامعة واسط/ كلية القانون
Mustafahd212@uowasit.edu.iq

الملخص

يتناول المقال فاعلية السياسات المناخية في خفض الانبعاثات الكربونية عبر مراجعة نقدية للأدبيات العلمية والتقييمات التجريبية التي تناولت نتائج تطبيق الأدوات الاقتصادية والتنظيمية والتمويلية في القطاعات الاقتصادية الرئيسة، ويهدف إلى تحديد مقدار التخفيضات المحققة وتحليل العوامل المؤثرة في تفاوت نتائج السياسات بين الدول والقطاعات، ويعتمد منهج المراجعة النقدية المنظمة للأدبيات مع توظيف التحليل المقارن والتركيب الموضوعي للأدلة التي استخدمت أساليب كمية وسببية لتقدير أثر التدخلات المناخية، وتوضح المراجعة وجود أدلة تجريبية معتبرة على قدرة تسعير الكربون ونظم تداول الانبعاثات والمعايير التنظيمية والحوافز الاستثمارية على خفض الانبعاثات، مع تفاوت النتائج تبعاً لتصميم السياسة ونطاق تغطيتها وخصائص القطاع المستهدف وقدرات التنفيذ المؤسسي، وتبرز التجارب القطاعية اختلافاً في سرعة الاستجابة وحجم التخفيض وتكاليف تحقيقه، نتيجة تباين البدائل التكنولوجية والبنية التحتية وطبيعة القرارات الاستثمارية والاستهلاكية، كما يتأثر الأثر الإجمالي بتفاعل الأدوات المناخية وبالقيود الاقتصادية والتوزيعية ومدى استمرارية الالتزامات الحكومية، وتخلص المراجعة إلى أن تحسين فاعلية السياسات يرتبط بتكامل أدواتها وتوسيع نطاق تطبيق التدخلات المثبتة تجريبياً وتطوير آليات القياس والتحقق وربط التقييمات الوطنية بمسارات خفض الانبعاثات اللازمة لتحقيق الأهداف المناخية الدولية.

الكلمات المفتاحية: السياسات المناخية؛ الانبعاثات الكربونية؛ تسعير الكربون؛ فاعلية السياسات؛ إزالة الكربون؛ التخفيف من تغير المناخ.

Abstract

This review critically examines the effectiveness of climate policies in reducing carbon emissions by synthesizing empirical evidence on economic, regulatory, and financial mitigation instruments across major economic sectors. It aims to assess documented emission reductions and identify the factors explaining variations in policy outcomes across countries and sectors. The article adopts a structured critical review approach, combining comparative analysis with a thematic synthesis of empirical studies, with particular attention to ex-post and causal evaluations. The evidence indicates that carbon pricing, emissions trading systems, regulatory standards, and investment incentives can achieve measurable emission reductions, although their effectiveness varies with policy design, sectoral characteristics, institutional capacity, and enforcement. Sectoral comparisons reveal substantial differences in mitigation performance,

هذا العمل مرخص بموجب الاسناد/ غير تجاري/ 4.0 دولي. CC BY-NC 4.0

https://doi.org/10.61353/ma.0260441

reflecting technological alternatives, infrastructure constraints, and investment and consumption patterns. The findings further highlight the significance of policy interactions, economic and distributional constraints, and the continuity of public commitments. The review concludes that improving climate policy effectiveness requires coherent policy mixes, wider implementation of empirically validated interventions, stronger monitoring and verification mechanisms, and closer alignment between national mitigation outcomes and global emission reduction requirements.
Keywords: Climate policies; Carbon emissions; Carbon pricing; Policy effectiveness; Decarbonization; Climate change mitigation.

المقدمة

اتسع نطاق التدخل الحكومي في معالجة تغير المناخ مع تزايد أهمية الانبعاثات الناتجة عن إنتاج الطاقة والأنشطة الصناعية والنقل واستخدامات الأراضي في تحديد المسار المستقبلي للاحترار العالمي، وقد أسهم اتفاق باريس للمناخ لسنة 2015 في تعزيز الأطر الوطنية لسياسات التخفيف عبر المساهمات المحددة وطنياً ودورات مراجعتها الدورية، وهو ما أتاح للدول تطوير أدوات اقتصادية وتنظيمية واستثمارية تتناسب مع هياكلها الإنتاجية والتزاماتها الدولية، غير أن العلاقة بين اعتماد هذه الأدوات ومقدار التخفيض المتحقق في الانبعاثات تتأثر بعوامل تتصل بتصميم السياسة والقدرات المؤسسية والتغير التكنولوجي والظروف الاقتصادية، وتزداد أهمية هذه العوامل مع تفاوت تكاليف التحول منخفض الكربون واختلاف درجة الاعتماد على الوقود الأحفوري بين الاقتصادات والقطاعات (Dubash et al., 2022).

تُظهر بيانات برنامج الأمم المتحدة للبيئة لعام 2026 استمرار اتساع الفجوة بين مسارات الانبعاثات العالمية والتخفيضات اللازمة للعودة إلى مستوى احترار قدره 1.5 درجة مئوية بحلول نهاية القرن، إذ يتطلب المسار الأقل تجاوزاً لهذا المستوى خفض انبعاثات غازات الدفيئة عالمياً بنسبة 18% بحلول سنة 2030 وبنسبة 45% بحلول سنة 2035 قياساً بمستويات سنة 2025، بينما تتراوح التخفيضات المتوقعة عند التنفيذ الكامل للمساهمات المحددة وطنياً بين 5% و8% بحلول 2030 وبين 11% و15% بحلول 2035، وتوضح هذه المقارنة محدودية الكفاية الإجمالية للالتزامات المناخية الراهنة ومدى الحاجة إلى رفع الفاعلية التنفيذية للسياسات المعتمدة وتوسيع نطاق التدخلات القادرة على تحقيق تخفيضات قابلة للقياس والتحقق (UNEP, 2026).

وتوفر التجارب الدولية أساساً متقدماً لتقويم النتائج العملية للسياسات المناخية، فقد شمل تقييم عالمي نُشر سنة 2024 نحو 1500 سياسة وتدخل مناخي اعتُمدت خلال المدة 1998–2022 في 41 دولة وحدد 63 تدخلاً ناجحاً ارتبطت بتخفيضات كبيرة في انبعاثات ثاني أكسيد الكربون تراوحت تقديرات مجموعها بين 0.6 و1.8 مليار طن، كما أظهرت مراجعة منهجية صدرت سنة 2025 وشملت

هذا العمل مرخص بموجب الاسناد/ غير تجاري/ 4.0 دولي. CC BY-NC 4.0

187 دراسة تجريبية ونحو 450 تقديراً للأثر أن معظم السياسات التي خضعت للتقييم حققت تخفيضات في الانبعاثات بوسيط يقارب 5% سنوياً مقارنة بالمسار المضاد للواقع الذي يفترض غياب السياسة، مع اختلاف ملموس بين الأدوات والقطاعات والأقاليم، وتؤكد هذه النتائج أهمية قياس الأثر السببي للتدخل المناخي ومراعاة تفاوت خصائص الدراسات قبل استخلاص أحكام عامة بشأن فاعلية السياسات (Stechemesser et al., 2024; OECD, 2025).

وتنبع إشكالية تقييم السياسات المناخية من تعدد المؤشرات المستخدمة لقياس نتائجها وتداخل آثار التدخل الحكومي مع التغيرات الاقتصادية والتكنولوجية المستقلة عنه، إذ يمكن أن تنخفض انبعاثات قطاع معين بفعل تباطؤ الإنتاج أو ارتفاع أسعار الطاقة أو تغير الأحوال الجوية، في حين تتطلب فاعلية السياسة تحديد مقدار التخفيض الذي يمكن إسناده إلى التدخل نفسه مقارنة بما كان سيحدث في غيابه، وتزداد صعوبة الإسناد السببي عندما تتزامن الضرائب الكربونية والحوافز الاستثمارية والمعايير التنظيمية داخل الاقتصاد الواحد وتختلف آثارها المباشرة وغير المباشرة، الأمر الذي يجعل تقييم السياسات مرتبطاً بجودة تصميم الدراسات وبقدرتها على ضبط المتغيرات المتزامنة ومقارنة النتائج المتحققة ضمن سياقات اقتصادية ومؤسسية متباينة (Döbbeling-Hildebrandt et al., 2024; OECD, 2026).

وتتمثل أهمية هذه المراجعة في الجمع بين ثلاثة أبعاد مترابطة لفاعلية السياسات المناخية تشمل مقدار التخفيض المثبت تجريبياً في الانبعاثات والظروف المؤسسية والقطاعية التي تحدد استمرارية هذا التخفيض ومساهمته في تقليص فجوة الانبعاثات العالمية، بما يسمح بتحديد مواقع القوة والقصور في الأدوات المناخية وبيان إمكانات تطويرها ضمن مسارات أكثر اتساقاً مع الأهداف الدولية، وتُصاغ المشكلة البحثية في السؤال الرئيس الآتي: ما مدى فاعلية السياسات المناخية في خفض الانبعاثات الكربونية وما العوامل التي تفسر تفاوت نتائجها بين الدول والقطاعات الاقتصادية.

منهجية مراجعة الأدبيات العلمية

اعتمد المقال منهج المراجعة النقدية المنظمة للأدبيات العلمية بهدف تركيب الأدلة المتعلقة بالفاعلية الفعلية للسياسات المناخية وتحديد العلاقات بين طبيعة التدخلات والنتائج المحققة والظروف المؤثرة فيها، وشملت عملية جمع المادة العلمية الأبحاث المحكمة والمراجعات المنهجية والتحليلات التلوية والتقييمات السببية والتقارير المؤسسية المنشورة حتى تشرين الأول 2026، مع التركيز على الأدبيات الصادرة خلال المدة 2015–2026 والاستعانة بعدد محدود من الدراسات السابقة ذات الأهمية التأسيسية، واستُخدمت مصطلحات بحثية مرتبطة بالسياسات المناخية وتقييم أثرها اللاحق للتطبيق والتسعير الكربوني وتداول الانبعاثات وكفاءة الطاقة وإزالة الكربون، مع إعطاء الأولوية للمصادر التي توفر تعريفاً واضحاً للسياسة المدروسة ومؤشرات النتائج والمنهج المستخدم في قياس أثرها.

هذا العمل مرخص بموجب الاسناد/ غير تجاري/ 4.0 دولي. CC BY-NC 4.0

استند اختيار الأدبيات إلى صلتها المباشرة بموضوع خفض الانبعاثات وإمكان التحقق من نتائجها ومعلوماتها الببليوغرافية، وأُعطيت أفضلية للدراسات التي اعتمدت المقارنة المضادة للواقع عبر أساليب الفروق في الفروق والضبط التركيبي والانحدار عند حدود التدخل والتصميمات شبه التجريبية الأخرى، نظراً لقدرتها على تقدير أثر السياسة بعد ضبط عدد من المتغيرات المؤثرة في النتائج، وتُستخدم المراجعات المنهجية والتحليلات التلوية لتحديد الأنماط العامة وتفسير اختلاف التقديرات، مع مراعاة احتمال اشتراكها في الدراسات الأولية نفسها وتفاوت جودة العينات والتصميمات البحثية التي تستند إليها (Stechemesser et al., 2024; Döbbeling-Hildebrandt et al., 2024; OECD, 2025).

تقتضي المقارنة بين النتائج ضبط الاختلاف في وحدات القياس والفترات الزمنية ومستويات التحليل، فبعض الدراسات تقيس التغير النسبي في انبعاثات ثاني أكسيد الكربون على مستوى الدولة أو القطاع بينما تقيس دراسات أخرى كثافة الانبعاثات لكل وحدة إنتاج أو لكل وحدة من الناتج المحلي أو الانبعاثات المتجنبة مقارنة بمسار افتراضي، كما تختلف انبعاثات ثاني أكسيد الكربون عن إجمالي غازات الدفيئة الذي يتضمن الميثان وأكسيد النيتروز ويُعبّر عنه بمكافئ ثاني أكسيد الكربون، ولذلك جرى التعامل مع نتائج كل دراسة ضمن نطاقها الأصلي مع توضيح طبيعة المؤشر المستخدم وحدود المقارنة، وتجنب جمع التخفيضات القطاعية المتداخلة في تقدير إجمالي واحد قد يؤدي إلى احتساب الأثر أكثر من مرة (OECD, 2025; IEA, 2026a).

تستند المراجعة إلى ثلاثة معايير تحليلية تشمل مقدار التخفيض الذي يمكن إسناده إلى السياسة المناخية واستمرارية الأثر في المدى الزمني المتاح للتقييم وكفاءة التنفيذ ضمن الظروف الاقتصادية والمؤسسية التي طُبقت فيها السياسة، مع التمييز بين مؤشرات المخرجات المباشرة مثل زيادة قدرات الطاقة المتجددة أو ارتفاع مبيعات المركبات الكهربائية وبين مؤشرات النتائج النهائية المتمثلة في الانبعاثات الفعلية، وتُستخدم التقديرات المستقبلية والتقارير الدولية لتحديد فجوة الطموح المناخي والكفاية الإجمالية للتدخلات بينما تُستمد أحكام الفاعلية السببية أساساً من دراسات التقييم اللاحق للتطبيق، وهو تمييز منهجي ضروري لتحديد مدى قوة الاستنتاجات المستخلصة من الأدلة المتاحة (Gillingham & Stock, 2018; OECD, 2026).

أولاً: أدوات السياسات المناخية وآليات خفض الانبعاثات الكربونية

1. أدوات التسعير الكربوني وآليات التأثير الاقتصادي

تقوم سياسات التسعير الكربوني على إدراج تكلفة الانبعاثات في القرارات الاقتصادية للمنتجين والمستهلكين من خلال تغيير الأسعار النسبية لمصادر الطاقة والسلع والخدمات كثيفة الكربون، وتتخذ هذه السياسات صورتين رئيسيتين تتمثلان في الضرائب الكربونية التي تحدد سعراً لكل وحدة

هذا العمل مرخص بموجب الاسناد/ غير تجاري/ 4.0 دولي. CC BY-NC 4.0

من الانبعاثات ونظم تداول الانبعاثات التي تحدد كميات مسموحاً بها وتتيح تداول التصاريح ضمن سوق منظمة، وتؤثر الأداتان في سلوك المنشآت عبر رفع التكلفة النسبية للوقود عالي الانبعاثات وتحسين الجدوى الاقتصادية للاستثمار في الكفاءة الطاقوية والتقنيات النظيفة، وتختلف درجة الاستجابة تبعاً لمرونة الطلب وتوفر البدائل وتكاليف استبدال المعدات وطول الأفق الاستثماري، وهو ما يفسر تفاوت النتائج بين الأنشطة الاقتصادية رغم تطبيق إشارات سعرية متقاربة (Goulder & Parry, 2008, p. 152; Best et al., 2020, p. 69).

وترتبط فاعلية التسعير الكربوني بنطاق تغطية الانبعاثات واستقرار الإطار التنظيمي وتوقعات الفاعلين الاقتصاديين بشأن تطور الأسعار، إذ يتيح وضوح المسار المستقبلي للسعر اتخاذ قرارات استثمارية في معدات وتقنيات يمتد عمرها التشغيلي سنوات طويلة، بينما تؤثر الإعفاءات المجانية وتعدد المعدلات الضريبية وتقلب أسعار التصاريح في توزيع أعباء الامتثال بين المنشآت وفي الحوافز المتاحة لخفض الانبعاثات، وقد بلغ عدد سياسات التسعير الكربوني المباشر المطبقة عالمياً 87 سياسة في سنة 2026 تغطي قرابة 30% من انبعاثات غازات الدفيئة العالمية، الأمر الذي يعكس توسع نطاق هذه الأدوات مع استمرار تفاوت تغطيتها القطاعية ومستويات أسعارها بين الدول (World Bank, 2026).

وتتيح الإيرادات المتولدة عن الضرائب الكربونية ومزادات تصاريح الانبعاثات للحكومات تمويل تدخلات إضافية تؤثر في تكلفة التحول الاقتصادي وقبوله اجتماعياً، وقد تجاوزت الإيرادات العامة الناتجة عن التسعير الكربوني 107 مليارات دولار خلال سنة 2025، ويمكن توجيه هذه الموارد لدعم الأسر المتأثرة بارتفاع أسعار الطاقة أو تمويل تحديث البنية التحتية والتكنولوجيات منخفضة الكربون، وتكتسب آليات إعادة توزيع الإيرادات أهمية خاصة عندما ترتفع نسبة الإنفاق على الطاقة في دخول الأسر محدودة الموارد، لأن الآثار التوزيعية غير المعالجة قد تحد من الاستقرار السياسي للسياسة أو تؤدي إلى تعديلها قبل تحقق آثارها طويلة الأجل (Klenert et al., 2018, p. 669; World Bank, 2026).

2. الأدوات التنظيمية والتشريعية لخفض الانبعاثات

تعمل السياسات التنظيمية من خلال تحديد متطلبات قانونية تتعلق بكفاءة الطاقة وحدود الانبعاثات وخصائص المنتجات والعمليات الصناعية، وتستهدف معالجة الحالات التي تتأخر فيها الاستجابة للحوافز السعرية بفعل ضعف المعلومات أو صعوبة التمويل أو ارتفاع تكاليف التحول التكنولوجي، وتظهر أهميتها في الأنشطة التي تعتمد على أصول طويلة العمر مثل المباني وشبكات النقل والمنشآت الصناعية، إذ يمكن للمعايير الإلزامية أن تؤثر في القرارات الاستثمارية عند التصميم والإنشاء والتحديث وتمنع استمرار أنماط إنتاج واستهلاك مرتفعة الانبعاثات خلال العمر التشغيلي للأصول، وترتبط كفاءة هذه الأدوات بمدى ملاءمة المعايير للقدرات التكنولوجية السائدة وبوضوح

هذا العمل مرخص بموجب الاسناد/ غير تجاري/ 4.0 دولي. CC BY-NC 4.0

آليات الفحص والامتثال وتكاليف الرقابة والتنفيذ (Goulder & Parry, 2008, p. 152; Dubash et al., 2022).

وتتفاوت آثار التنظيم تبعاً لطريقة صياغة الالتزام القانوني، فالمعايير القائمة على الأداء تمنح المنشآت مرونة أكبر في اختيار تقنيات الامتثال بينما تؤدي متطلبات تبني تكنولوجيا محددة إلى تضييق البدائل المتاحة وقد تزيد تكاليف التنفيذ عندما تختلف ظروف المنشآت، كما تؤثر فترات الانتقال والاستثناءات القطاعية وآليات العقوبات في توقيت الاستجابة وحجم التغييرات الفعلية، وتتطلب السياسات القائمة على حدود الانبعاثات منظومة قياس موثوقة تضمن ارتباط الامتثال بالتخفيض المحقق وتحد من نقل الأنشطة الملوثة إلى مواقع أو منشآت خارج نطاق التنظيم، ولذلك تتحدد فاعلية التشريع المناخي بدرجة اتساق متطلباته مع طبيعة القطاع والقدرة المؤسسية على تطبيقها والتحقق من نتائجها (Dubash et al., 2022; OECD, 2026).

3. الحوافز المالية والاستثمارية وتقنيات إزالة الكربون

تؤثر الحوافز المالية والاستثمارية في مسار الانبعاثات عبر تخفيض تكاليف تطوير التقنيات النظيفة ونشرها وتهيئة البنية التحتية اللازمة لاستخدامها على نطاق اقتصادي واسع، وتشمل هذه التدخلات دعم البحث والتطوير والتمويل الميسر والحوافز الضريبية وضمانات الاستثمار وآليات دعم توليد الكهرباء المتجددة، وتكتسب أهميتها في المراحل التي تواجه فيها التقنيات الجديدة ارتفاعاً في التكاليف ومحدودية في الأسواق وسلاسل التوريد، إذ يسهم توسيع الإنتاج والتعلم الصناعي وتراكم الخبرة التشغيلية في خفض التكلفة وتحسين القدرة التنافسية، وهو ما يعزز إمكانية انتقال المؤسسات والأسر إلى بدائل أقل كثافة كربونية مع استمرار التحسن التكنولوجي (Johnstone et al., 2010, p. 133; Meckling et al., 2017, p. 918).

وتوضح التطورات الحديثة في تكاليف الطاقة المتجددة طبيعة العلاقة بين الدعم المبكر والنضج التكنولوجي واتساع الأسواق، فقد بلغ المتوسط العالمي المرجح لتكلفة توليد الكهرباء من الطاقة الشمسية الكهروضوئية نحو 44 دولاراً لكل ميغاواط ساعة سنة 2025 مقابل 33 دولاراً لطاقة الرياح البرية، كما كانت تكلفة الكهرباء في أكثر من 90% من مشروعات الطاقة المتجددة الكبيرة التي دخلت الخدمة خلال السنة نفسها أدنى من تكلفة أرخص محطة جديدة تعتمد على الوقود الأحفوري في أسواقها، وتؤثر هذه الفروق في قدرة التقنيات النظيفة على جذب الاستثمار وتقليص الاعتماد على الوقود مرتفع الانبعاثات، مع استمرار أهمية تكاليف التمويل وتطوير الشبكات والتخزين وموثوقية الإمدادات في تحديد سرعة التوسع الفعلي (IRENA, 2026).

وتفرض الحوافز الاستثمارية متطلبات تقييم تتصل بالإضافية الاقتصادية والبيئية، إذ يتوقف التخفيض المنسوب إلى الدعم على مقدار الاستثمار أو الاستخدام منخفض الكربون الذي تحقق بفعل السياسة مقارنة بما كان سيحدث في غيابها، وقد تؤدي الحوافز العامة إلى تمويل مشروعات أو

هذا العمل مرخص بموجب الاسناد/ غير تجاري/ 4.0 دولي. CC BY-NC 4.0

مشتريات كانت ستُنفذ بصورة مستقلة عن الدعم الحكومي، بما يرفع التكلفة المالية لكل طن من الانبعاثات المتجنبة، كما يتأثر الأثر النهائي بمصدر الكهرباء المستخدمة وكثافة الانبعاثات في تصنيع المعدات وأنماط تشغيلها، ولذلك تكتسب دقة الاستهداف وآليات التحقق اللاحق ومراجعة الدعم دوراً مركزياً في تحسين الكفاءة الاقتصادية والبيئية للسياسة (Gillingham & Stock, 2018, p. 53; Haan et al., 2025, p. 185).

ثانياً: فاعلية السياسات المناخية في القطاعات الاقتصادية وفق الأدلة التجريبية

1. قطاع إنتاج الكهرباء والتحول نحو الطاقة منخفضة الكربون

تُظهر نتائج تقييم السياسات المناخية في قطاع الكهرباء قدرة أدوات التسعير والتنظيم على تغيير مزيج الوقود المستخدم في التوليد خلال مدد زمنية أقصر نسبياً من القطاعات التي تتطلب استبدالاً شاملاً للأصول والبنى الإنتاجية، إذ تؤثر أسعار الانبعاثات في تكاليف التشغيل الحدية لمحطات الكهرباء وتغير ترتيب تشغيلها بحسب التكلفة، وقد حقق تطبيق الحد الأدنى لسعر الكربون في بريطانيا ابتداءً من سنة 2013 تخفيضاً مقدراً بنسبة 26% في انبعاثات ثاني أكسيد الكربون المرتبطة بتوليد الكهرباء خلال ثلاث سنوات، واستند تقدير الأثر إلى تحليل الانقطاعات الزمنية في الإنتاج باستخدام بيانات تفصيلية لانبعاثات المحطات العاملة بالوقود الأحفوري، وكان إحلال الغاز الطبيعي محل الفحم مرتفع الانبعاثات أحد العوامل الرئيسة التي فسرت النتائج، بما يوضح أثر الفروق في كثافة الكربون بين مصادر التوليد في استجابة منشآت الكهرباء للتدخل السعري (Gugler et al., 2023).

وتتأثر نتائج تسعير الانبعاثات في قطاع الكهرباء بوجود سياسات موازية لتطوير مصادر التوليد منخفضة الكربون، إذ حققت كاليفورنيا تخفيضاً في انبعاثات الفرد من قطاع الكهرباء بلغ 48% مقارنة بمسار ضابط تركيبي خلال المدة التي شملها التقييم حتى سنة 2019، وارتبط هذا التخفيض بتراجع الاعتماد على الغاز الطبيعي وتوسع التوليد المتجدد ضمن منظومة ضمت تداول الانبعاثات وأدوات أخرى لدعم الطاقة النظيفة، وتكشف هذه الحالة أهمية مراعاة تداخل السياسات عند تفسير النتائج نظراً لصعوبة الفصل الكامل بين أثر سعر الكربون وأثر الاستثمارات والتشريعات المصاحبة، كما توضح أن فاعلية منظومة السياسات قد تتفاوت بين القطاعات التي تخضع لها داخل الولاية الواحدة (Lessmann & Kramer, 2024).

وتؤثر معايير حصة الطاقة المتجددة في انبعاثات الكهرباء عبر تعديل قرارات الاستثمار وتركيب القدرة الإنتاجية ومعدلات تشغيل المحطات التقليدية، غير أن نتائجها تتأثر بخصائص الموارد المحلية وتكاليف الشبكات ومرونتها وإمكانات التخزين والربط الكهربائي، وقد بيّن تحليل تجريبي لولايات أمريكية خلال المدة 1990–2015 أن العلاقة بين تشديد معايير الكهرباء المتجددة والانبعاثات تختلف باختلاف مصادر الطاقة المتاحة ودرجة تقطع إنتاج الرياح والشمس، بما يعكس تأثير قيود النظام الكهربائي في مقدار الإحلال الفعلي للوقود الأحفوري، ويؤكد ذلك أهمية تقييم الانبعاثات الناتجة عن

هذا العمل مرخص بموجب الاسناد/ غير تجاري/ 4.0 دولي. CC BY-NC 4.0

التوليد الكلي والتغير في تشغيل المصادر التقليدية عند قياس أداء السياسات المتجددة (Fullerton & Ta, 2025, p. 65).

وعلى المستوى العالمي أسهم توسع تقنيات الطاقة منخفضة الانبعاثات في الحد من ارتفاع انبعاثات قطاع الطاقة، فقد بلغت الانبعاثات التي قُدّر تجنبها سنوياً نتيجة نشر الطاقة الشمسية والرياح والطاقة النووية والمركبات الكهربائية والمضخات الحرارية منذ سنة 2019 نحو ثلاثة مليارات طن من ثاني أكسيد الكربون في سنة 2025، بما يعادل قرابة 8% من الانبعاثات العالمية المرتبطة بالطاقة، بينما استمرت انبعاثات الطاقة العالمية في الارتفاع بنسبة تقارب 0.4% خلال السنة نفسها، وتتعلق هذه التقديرات بالأثر المقارن لنشر مجموعة من التقنيات منخفضة الانبعاثات ضمن مسار افتراضي ولا تعبر عن أثر سببي منفصل لسياسة مناخية بعينها، كما يوضح استمرار نمو الانبعاثات أن زيادة القدرات النظيفة قد تتزامن مع ارتفاع الطلب الكلي على الطاقة وتوسع استخدام الوقود الأحفوري (IEA, 2026a).

2. القطاعات الصناعية كثيفة الانبعاثات

ترتبط استجابة الأنشطة الصناعية للسياسات المناخية بخصائص العمليات الإنتاجية وكثافة استهلاك الطاقة وطبيعة رأس المال المستخدم، إذ تتطلب الصناعات القائمة على عمليات حرارية وكيميائية كثيفة الانبعاثات استثمارات كبيرة لتحديث المعدات وتغيير مصادر الطاقة وتطوير تقنيات الإنتاج، وقد حقق نظام تداول الانبعاثات الأوروبي تخفيضاً مقدراً بنحو 10% في الانبعاثات الصادرة عن المنشآت المشمولة بالتقييم في فرنسا وهولندا والنرويج والمملكة المتحدة خلال المدة 2005–2012، مع غياب أثر سلبي ذي دلالة إحصائية على أرباح الشركات والعمالة في العينة الأوسع التي شملها تحليل الأداء الاقتصادي، وتوضح النتائج إمكانية تحقيق تخفيضات صناعية مرتبطة بالتنظيم الكربوني بالتزامن مع المحافظة على النشاط الاقتصادي في ظل ظروف معينة من التسعير والامتثال والاستثمار (Dechezleprêtre et al., 2023).

وتتضح أهمية الاستثمار في تخفيض كثافة الانبعاثات الصناعية عند فحص استجابة المنشآت المشمولة بنظام التداول الأوروبي على مستوى الشركات، إذ تراوح الانخفاض المقدّر في انبعاثات ثاني أكسيد الكربون للمنشآت الصناعية الخاضعة للنظام بين 14% و16% مقارنة بالمنشآت المرجعية، وارتبطت النتيجة باستثمارات موجهة لتحسين كثافة الطاقة والانبعاثات في الإنتاج مع غياب انكماش اقتصادي قابل للكشف في المنشآت المدروسة، كما لم تُسجل أدلة على نقل إنتاج كثيف الانبعاثات إلى منشآت أو أسواق خارج نطاق التنظيم ضمن العينة والفترة محل التقييم، ويعكس ذلك أهمية التمييز بين الخفض الناتج عن انخفاض الإنتاج والخفض الناتج عن التحسين التكنولوجي وكفاءة العمليات الصناعية عند تحديد الأثر البيئي النهائي للسياسة (Colmer et al., 2025, p. 1625).

هذا العمل مرخص بموجب الاسناد/ غير تجاري/ 4.0 دولي. CC BY-NC 4.0

وتكشف تجربة كاليفورنيا عن تفاوت الاستجابة الصناعية داخل منظومة السياسة المناخية نفسها، إذ كانت انبعاثات الصناعة أعلى بنسبة 6% من المسار المضاد للواقع في نهاية فترة التقييم سنة 2019 رغم التخفيض الملحوظ في قطاع الكهرباء، وتفسر هذه النتيجة في ضوء الاختلاف بين خصائص الاستثمار الصناعي وبدائل إزالة الكربون وطبيعة السياسات المكملة وتوزيع حوافز الامتثال، مع مراعاة أن النتيجة تخص التجربة والفترة المشمولتين بالتقدير، وتؤكد المقارنة القطاعية ضرورة تحليل أثر السياسة على مستوى كل نشاط اقتصادي قبل إصدار حكم على فاعليتها الإجمالية، لأن متوسط التخفيض العام قد يخفي تبايناً في اتجاهات الانبعاثات بين القطاعات الخاضعة للتنظيم (Lessmann & Kramer, 2024).

3. قطاع النقل وسياسات خفض استهلاك الوقود

تواجه السياسات المناخية في قطاع النقل تحديات مرتبطة باتساع نطاق الملكية الفردية للمركبات وطول العمر التشغيلي لأساطيل النقل واعتماد قرارات الاستهلاك على أسعار الوقود والبنية التحتية والخصائص السلوكية للمستخدمين، وقد أدى تطبيق الضريبة الكربونية وضريبة القيمة المضافة على وقود النقل في السويد إلى انخفاض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون من النقل بنسبة تقارب 11% مقارنة بمسار ضابط تركيبي مؤلف من مجموعة دول مماثلة، مع إسناد الحصة الأكبر من التخفيض إلى الضريبة الكربونية، وتبرز النتيجة قدرة السياسة الضريبية على التأثير في الاستهلاك بما يتجاوز التغيرات السعرية قصيرة الأجل، نتيجة ما تولده الضرائب المستمرة من حوافز لتغيير أنماط استخدام المركبات والاستثمار في خيارات أقل استهلاكاً للوقود (Andersson, 2019, p. 1).

وتُعد حوافز المركبات الكهربائية أداة رئيسة لتعديل تركيب أسطول النقل البري عبر تخفيض تكلفة الشراء وتحسين القدرة التنافسية للمركبات منخفضة الانبعاثات، وقد ارتبطت الإعانات الحكومية في ألمانيا خلال المدة 2015–2022 بنحو 40% من تسجيلات المركبات الكهربائية العاملة بالبطارية و25% من تسجيلات المركبات الهجينة القابلة للشحن، وفق تقديرات الأثر الإضافي للإعانات، وبلغت التكلفة المقدرة لتجنب طن من ثاني أكسيد الكربون نحو 870 يورو للمركبات الكهربائية العاملة بالبطارية مقابل 2470 يورو للمركبات الهجينة القابلة للشحن، مع تركز الاستفادة بدرجة أكبر في المناطق الأعلى دخلاً، وتوضح هذه الفروق أهمية تصميم الحوافز على أساس نتائج الانبعاثات المتوقعة لكل نوع من المركبات وكفاءة الإنفاق العام وتوزيع المنافع بين الفئات الاجتماعية (Haan et al., 2025, p. 185).

وتوفر النرويج نموذجاً متقدماً لتأثير الإعفاءات الضريبية في تسريع انتشار المركبات الكهربائية، إذ قُدّرت حصة المركبات الكهربائية في مبيعات السيارات الجديدة سنة 2021 بنحو 66% بينما كان من الممكن أن تنخفض إلى 25% في السيناريو المضاد للواقع عند إزالة الإعفاء من ضريبة شراء هذه المركبات، وتوضح هذه النتيجة الوزن الكبير للإعفاءات في قرارات الشراء، مع ارتفاع تكاليف الإيرادات

هذا العمل مرخص بموجب الاسناد/ غير تجاري/ 4.0 دولي. CC BY-NC 4.0

الضريبية التي تتخلى عنها الدولة مقابل التخفيض المحقق، وقد قدرت محاكاة هيكلية أخرى للحوافز الضريبية النرويجية خلال المدة 2010–2019 تخفيض الانبعاثات على مدى العمر التشغيلي للمركبات بنحو ثلاثة ملايين طن من ثاني أكسيد الكربون وتكلفة مالية تقارب 1217 يورو للطن المتجنب، وتبقى هذه النتائج مرتبطة بفرضيات النموذج وسلوك السوق ومزيج الكهرباء وتختلف في طبيعتها المنهجية عن القياسات السببية المباشرة لانبعاثات النقل (Cincotta & Thomassen, 2025; Mustafa, 2026).

وتتأثر فاعلية معايير كفاءة استهلاك الوقود بما يُعرف بالأثر الارتدادي، إذ يؤدي انخفاض تكلفة قطع المسافة الواحدة بالمركبات الأكثر كفاءة إلى زيادة جاذبية استخدامها وقد يشجع على ارتفاع المسافات المقطوعة، وهو ما يقلص جزءاً من الوفورات النظرية في استهلاك الوقود والانبعاثات، وقد تراوحت تقديرات الأثر الارتدادي في تحليل للطلب على البنزين في الولايات المتحدة بين 20% و70% من التحسن المحتمل في كفاءة الاستهلاك بحسب الافتراضات والأفق الزمني، وتستدعي هذه النتيجة التمييز بين تحسين الكفاءة الفنية للمركبة والتخفيض النهائي المتحقق في استهلاك الوقود، مع مراعاة أن حجم الأثر يتغير بحسب أسعار الوقود والخصائص السلوكية ومستوى الدخل وأنماط التنقل (Huntington, 2024).

4. **قطاع المباني وكفاءة استخدام الطاقة**

تؤثر سياسات كفاءة الطاقة في المباني من خلال تحسين خصائص العزل والتدفئة والتبريد والإضاءة ورفع كفاءة التجهيزات المستخدمة، وتزداد أهمية التدخل التنظيمي في هذا القطاع بسبب طول العمر التشغيلي للمباني وصعوبة تعديل بعض خصائصها الإنشائية بعد اكتمال البناء، وقد ارتبط تشديد متطلبات كفاءة الطاقة في ولاية فلوريدا الأمريكية سنة 2002 بتخفيض استهلاك الكهرباء بنحو 4% والغاز الطبيعي بنحو 6% في المباني السكنية التي شملها التقييم مقارنة بالمباني المرجعية، مع اعتماد بيانات الفواتير الفعلية بدلاً من تقديرات الأداء الهندسي وحدها، وتوضح هذه النتائج أهمية تضمين الاختلاف في خصائص المباني والاستخدامات السكنية والظروف المناخية عند تقدير أثر المعايير التنظيمية (Jacobsen & Kotchen, 2013, p. 34).

وتتطلب فاعلية معايير البناء مراقبة استمرارية الوفورات عبر مدد تشغيل طويلة، إذ أظهر تقييم لاحق للمباني نفسها في فلوريدا باستخدام بيانات امتدت أحد عشر عاماً استمرار الوفورات المرتبطة باستهلاك الغاز الطبيعي مع تباين نتائج استهلاك الكهرباء في الأجل الطويل، بينما كشفت تقييمات معايير البناء في كاليفورنيا وجود اختلاف بين الوفورات الفعلية والتقديرات المعتمدة عند إقرار التشريعات، ويرتبط هذا التباين باختلاف درجات الحرارة واستخدام أجهزة التدفئة والتبريد وأنماط إشغال المباني وتطور التجهيزات المنزلية، وهو ما يبرز الحاجة إلى اعتماد القياسات التشغيلية الفعلية

هذا العمل مرخص بموجب الاسناد/ غير تجاري/ 4.0 دولي. CC BY-NC 4.0

وتقييم الأثر التراكمي للتغيرات السلوكية والتكنولوجية في الأداء البيئي للمعايير (Kotchen, 2017, p. 135; Levinson, 2016, p. 2867).

وتنطوي كفاءة الطاقة في المباني على علاقة مباشرة بكثافة الكربون في مصادر الإمداد الكهربائي والحراري، إذ يختلف مقدار التخفيض الناتج عن توفير وحدة من الكهرباء باختلاف المزيج المستخدم في توليدها، كما تتأثر النتائج بمعدلات التوسع العمراني ونوعية الوقود المستخدم في التدفئة والقدرة على تمويل تحديث المباني القديمة، ولهذا تتفاوت فاعلية البرامج القائمة على حوافز التجديد والضوابط التنظيمية بين المناطق ذات الأنظمة الكهربائية مرتفعة الانبعاثات والمناطق التي تعتمد بدرجة أكبر على مصادر منخفضة الكربون، وتصبح دراسة التفاعل بين تحسين الكفاءة وإزالة الكربون من قطاع الكهرباء ضرورية عند تقدير الأثر البيئي الكلي وتجنب المبالغة في التخفيضات المنسوبة إلى برامج البناء منفردة (Gillingham & Stock, 2018; OECD, 2025).

5. الزراعة والغابات واستخدامات الأراضي

تختلف طبيعة خفض الانبعاثات في الزراعة والغابات واستخدامات الأراضي عن القطاعات القائمة على احتراق الوقود، إذ ترتبط النتائج بالحد من إزالة الغابات والمحافظة على مخزونات الكربون في التربة والغطاء النباتي وتحسين إدارة الأراضي وتقليل انبعاثات الميثان وأكسيد النيتروز الناتجة عن الأنشطة الزراعية، وتتسم عملية القياس بدرجة عالية من التعقيد نتيجة التفاوت المكاني والزماني في استخدامات الأراضي وتأثر مخزونات الكربون بالعوامل الطبيعية والممارسات البشرية، وتزداد أهمية الرقابة على التغير في الغطاء الحرجي عند تقييم السياسات التي تستهدف حماية الغابات، لأن الانخفاض المسجل في معدلات الإزالة يتأثر بأسعار المنتجات الزراعية والطلب على الأراضي والقدرة على إنفاذ القيود البيئية وتطور وسائل الرصد (Assunção et al., 2015; West & Fearnside, 2021). وتوفر البرازيل أدلة مهمة بشأن أثر الرقابة المؤسسية في حماية الغابات، فقد تراجعت معدلات إزالة الغابات في الأمازون بنحو 80% خلال المدة 2004–2012 بالتزامن مع تطبيق خطة منع إزالة الغابات ومكافحتها، وارتبط جزء مهم من هذا التراجع بتحسين نظم المراقبة الفضائية وتوجيه إجراءات إنفاذ القانون نحو المناطق مرتفعة المخاطر وتقييد بعض الأنشطة المخالفة، مع مساهمة التغيرات في أسعار السلع الزراعية والعوامل الاقتصادية في تفسير جانب من النتائج، كما أثبتت التقييمات السببية لآلية الإنذار شبه الفوري المعتمدة على صور الأقمار الصناعية دور المراقبة البيئية والتدخل التنفيذي في الحد من إزالة الغابات، وتوضح التجربة أهمية التكامل بين تكنولوجيا الكشف المبكر وقدرة المؤسسات الحكومية على اتخاذ إجراءات فعلية تجاه المخالفات (Assunção et al., 2023, p. 125; West & Fearnside, 2021).

وتبرز فعالية الاستهداف المكاني للسياسات البيئية عند تركيز الرقابة والعقوبات على المناطق الأعلى احتمالاً لإزالة الغابات، إذ أسهمت قائمة البلديات ذات الأولوية في الأمازون البرازيلية في تخفيض إزالة

هذا العمل مرخص بموجب الاسناد/ غير تجاري/ 4.0 دولي. CC BY-NC 4.0

الغابات بنسبة مقدرة بلغت 40% ضمن التقييم السببي للتدخل، وكان من الممكن تحسين الأثر الإجمالي باستخدام توزيع مختلف للموارد الرقابية يراعي مقدار التخفيض المتوقع في كل منطقة، وتكتسب هذه النتيجة أهمية مؤسسية لأنها تربط الفاعلية البيئية بكفاءة تخصيص الموارد العامة في ظل محدودية الموازنات التنفيذية، كما توضح قدرة السياسات الموجهة مكانياً على تحقيق تخفيضات أكبر عندما تستند قرارات الرقابة إلى المعلومات الدقيقة عن مصادر المخاطر والخصائص الاقتصادية للأراضي (Assunção et al., 2023).

وتثير مشروعات تعويض الانبعاثات عبر المحافظة على الغابات إشكالية تتعلق بدقة احتساب التخفيضات المعلنة ودرجة إضافيتها، فقد أظهر تقييم شمل 26 مشروعاً للحد من إزالة الغابات في ست دول أن غالبية المشروعات حققت نتائج محدودة أو افتقرت إلى دليل إحصائي على تخفيض الإزالة، بينما كانت التخفيضات الفعلية أقل من الكميات المعلنة في المشروعات التي حققت أثراً إيجابياً، كما أظهر تركيب مستقل لستة تقييمات شملت 44 مشروعاً أن الكميات التي طالبت بها هذه المشروعات بوصفها إزالة غابات متجنبة بلغت في مجموعها نحو 10.7 أضعاف الكميات التي تدعمها التقديرات المستقلة، وتتمثل المشكلة المركزية في اختلاف خطوط الأساس الافتراضية وتحيز اختيار مناطق المقارنة، الأمر الذي يستدعي تطوير أنظمة اعتماد أرصدة الكربون والتحقق اللاحق من التخفيضات الفعلية (West et al., 2023, p. 873; Swinfield et al., 2026).

وتكشف الحصيلة القطاعية عن اختلاف واضح في إمكانات التخفيف والمدة اللازمة لظهور النتائج، إذ تستجيب بعض أنشطة توليد الكهرباء لإشارات الأسعار وتوفر بدائل الوقود على نحو سريع نسبياً، بينما تحتاج عمليات إزالة الكربون الصناعية وتحديث المباني وأساطيل النقل إلى مدد استثمارية أطول، وتتأثر سياسات الأراضي والغابات بجودة الرقابة وقدرة الدولة على منع المخالفات وضمان استمرارية تخزين الكربون، ويعكس هذا التفاوت أهمية تصميم أدوات متخصصة تتلاءم مع الخصائص الفنية والمؤسسية لكل قطاع، مع تقييم النتائج على أساس التخفيضات المنسوبة فعلياً إلى التدخلات ومراعاة تفاوت الأدلة المتاحة، حيث تظل نتائج بعض القطاعات أكثر استناداً إلى تقييمات سببية متكررة مقارنة بقطاعات أخرى تتسم بضعف البيانات وطول دورات الأثر (OECD, 2025; Zhang et al., 2026).

ثالثاً: محددات فاعلية السياسات المناخية وفجوة خفض الانبعاثات العالمية

1. القدرات المؤسسية وجودة تنفيذ السياسات

تتحدد فاعلية السياسات المناخية بدرجة كبيرة من خلال قدرة المؤسسات على تحويل الالتزامات التشريعية والاقتصادية إلى متطلبات قابلة للتطبيق والقياس والمتابعة، وتشمل هذه القدرة توفر البيانات الدقيقة والسجلات البيئية وكفاءة الرقابة والتنسيق بين الجهات القطاعية واستقرار القواعد المنظمة للامتثال، وقد أظهر تحليل تلوي حديث شمل 336 تقديراً للأثر مأخوذة من 121

هذا العمل مرخص بموجب الاسناد/ غير تجاري/ 4.0 دولي. CC BY-NC 4.0

دراسة تجريبية أن خصائص الاقتصاد الكلي المرصودة مثل مستوى الدخل وأسعار النفط والانكشاف التجاري وسيادة القانون تفسر جانباً محدوداً من التفاوت في تقديرات الفاعلية، مع بروز أهمية العوامل المؤسسية التي يصعب قياسها بصورة مباشرة مثل شدة إنفاذ السياسات والكفاءة الإدارية، وتوضح هذه النتيجة الحاجة إلى إدراج خصائص التنفيذ بوصفها متغيرات مستقلة في التقييمات المقارنة بدلاً من الاكتفاء بوجود القانون أو الأداة الاقتصادية (OECD, 2026).

وتظهر أهمية جودة القياس في القطاعات التي تتسم بتعدد مصادر الانبعاثات وصعوبة مراقبتها المباشرة، إذ خلص تقييم لبرامج كشف تسرب الميثان وإصلاحه في مقاطعة كولومبيا البريطانية الكندية إلى أن بيانات المسوح التنظيمية الدورية أظهرت انخفاض الانبعاثات المكتشفة بنحو النصف في المواقع الممتثلة بالكامل، بينما رصدت المسوح الجوية المستقلة في مجموعة المواقع نفسها انبعاثات ميثان أعلى بنحو اثني عشر ضعفاً من الكميات المكتشفة بالأسلوب التنظيمي، وتعكس هذه الفروق حدود الاعتماد على تقنية مراقبة واحدة في تقدير الانبعاثات الفعلية وتحديد الأثر النهائي لإجراءات المعالجة، كما تؤكد أهمية تطوير نظم قياس متعددة المصادر تتضمن الاستشعار عن بعد والبيانات التشغيلية والتحقق المستقل قبل اعتماد التخفيضات المسجلة (Wilde et al., 2025, p. 2527).

وترتبط استمرارية النتائج بمدى ثبات القرارات التنظيمية وتنفيذها ضمن جداول زمنية واضحة، فقد انخفضت كثافة انبعاثات الميثان في قطاع النفط والغاز الأمريكي بنحو 11.1% خلال المدة 2019–2024 وفق تقديرات قائمة على الملاحظات الفضائية، بينما أظهرت المقارنة الزمنية محدودية الأدلة على أثر مباشر للإجراءات الاتحادية الجديدة التي واجهت تأخيرات تنفيذية وتعديلات سياسية، وارتبط جانب من التحسن بالتقدم التشغيلي والتكنولوجي والتشريعات السابقة، وتوفر هذه الحالة مثالاً على أهمية الفصل بين التحسن البيئي الذي يحدث خلال فترة تطبيق السياسة والتخفيض الذي يمكن إسناده إلى قواعدها الجديدة، لأن التزامن الزمني وحده قد يؤدي إلى المبالغة في تقدير الفاعلية أو إغفال مساهمة المتغيرات المستقلة (Chen et al., 2026).

2. تكامل أدوات السياسة المناخية وتعارض آثارها

تتأثر نتائج السياسات المناخية بالتفاعلات التي تنشأ عند تطبيق الأدوات الاقتصادية والتنظيمية والاستثمارية بصورة متزامنة، إذ يمكن أن يؤدي دعم التقنيات النظيفة إلى خفض تكاليف الامتثال للتسعير الكربوني وتسريع استجابة المنتجين والمستهلكين، كما يمكن للمعايير التنظيمية أن تعالج قيود التمويل والمعلومات التي تحد من الاستجابة للسعر، غير أن تعدد التدخلات يفرض ضرورة تنسيق الأهداف والمتطلبات لتجنب ازدواجية التكاليف أو إضعاف الحوافز الاستثمارية، ويزداد أثر تسلسل السياسات عندما يُستخدم الدعم التكنولوجي المبكر لبناء قدرات إنتاجية وأسواق تسمح بتطبيق أدوات أكثر صرامة في المراحل اللاحقة، مع مراعاة مخاطر استمرار الحوافز بعد تراجع الحاجة الاقتصادية إليها (Meckling et al., 2017, p. 918; Goulder & Parry, 2008).

هذا العمل مرخص بموجب الاسناد/ غير تجاري/ 4.0 دولي. CC BY-NC 4.0

وتوضح الأدلة المقارنة أن التفاعل بين السياسات يمكن أن يغير الأثر النهائي للتسعير الكربوني بدرجة ملموسة، إذ شمل تحليل دولي نُشر سنة 2026 أكثر من عشرة آلاف سياسة مناخية في أكثر من مئة دولة، ووجد أن نظم تداول الانبعاثات والضرائب الكربونية ارتبطت بتخفيض متوسط كثافة الانبعاثات بنحو 15.4% و8.5% على التوالي في ظروف الأسعار والتغطية التاريخية التي شملها التقدير، كما أظهرت المحاكاة المضادة للواقع أن الحد من حالات التعارض بين التدخلات يمكن أن يحسن فاعلية التسعير الكربوني بنسبة تصل إلى 22.3%، وتوضح هذه النتائج أهمية اتساق السياسات في تحديد أثرها الفعلي مع ضرورة التعامل مع تقديرات كثافة الانبعاثات والسيناريوهات المحاكية باعتبارها مؤشرات مختلفة عن مقدار التخفيض المطلق الذي تحقق في الانبعاثات (Wu et al., 2026, p. 441).

وتتضح أهمية ملاءمة أدوات السياسة لخصائص القطاعات في اختلاف النتائج بين الحوافز والتسعير والمعايير التنظيمية، فقد شمل تحليل تلوي عالمي صدر سنة 2026 تسعاً وتسعين دراسة تجريبية وأكثر من ألف تقدير معياري للأثر موزعة على 37 أداة لإزالة الكربون، وأظهر قوة نسبية في نتائج عدد من أدوات السوق مع وجود تدخلات حققت نتائج محدودة أو ارتبطت بارتفاع الانبعاثات في سياقات معينة، وتكشف هذه التباينات عن أثر تصميم السياسة والقطاع المستهدف والظروف المؤسسية في اتجاه النتيجة وحجمها، كما تشير إلى أهمية إعادة تقويم الأدوات التي تحقق نتائج دون المستوى المتوقع وتحليل أسباب التعارض بينها وبين بقية السياسات قبل توسيع نطاق تطبيقها (Zhang et al., 2026).

3. القيود الاقتصادية والاجتماعية على استدامة خفض الانبعاثات

تمثل تكاليف التحول منخفض الكربون وتوزيع أعبائها أحد المحددات الرئيسة لاستمرار السياسات المناخية، إذ تؤثر الضرائب وأسعار الطاقة ومتطلبات تحديث المعدات في القدرة الشرائية للأسر وتنافسية المنشآت وتوزيع العوائد بين الفئات الاقتصادية، وتختلف الآثار التوزيعية تبعاً لحصة الطاقة في الإنفاق الأسري والبدائل المتاحة في النقل والتدفئة وطبيعة النشاط الصناعي، ويمكن تخفيف هذه الآثار باستخدام آليات تعويض تستهدف الفئات الأكثر تعرضاً للتكاليف مع المحافظة على الحافز السعري لخفض الاستهلاك الكربوني، كما يرتبط قبول السياسات بدرجة الثقة في المؤسسات ووضوح استخدام الإيرادات وتوقعات المواطنين بشأن النتائج الاقتصادية والبيئية المتحققة (Klenert et al., 2018, p. 669; Carattini et al., 2018).

وتبرز أهمية تصميم إعادة توزيع الإيرادات عند مقارنة كفاءة السياسة بيئياً مع قابليتها للاستمرار اجتماعياً، إذ يمكن أن تؤدي التعويضات المباشرة للأسر إلى الحد من العبء النسبي للتسعير الكربوني على ذوي الدخول المنخفضة بينما تسهم الاستثمارات العامة في النقل والكفاءة الطاقوية في توفير بدائل تقلل تكاليف الاستجابة خلال الأجل المتوسط، ويتوقف أثر هذه المعالجات على دقة تحديد

هذا العمل مرخص بموجب الاسناد/ غير تجاري/ 4.0 دولي. CC BY-NC 4.0

المستفيدين وتوقيت تقديم الدعم وارتباطه بتطور أسعار الطاقة، وقد أظهرت التجربة الكندية في كولومبيا البريطانية ارتباط الضريبة الكربونية بتخفيضات مقدرة للانبعاثات تراوحت بين 5% و15% بعد التطبيق وفق الدراسات والنماذج التي شملتها المراجعة، مع آثار كلية محدودة على النشاط الاقتصادي وتطور تدريجي في مستوى التأييد العام للسياسة (Murray & Rivers, 2015, p. 674).

وتؤثر السياسات المالية المرتبطة بالوقود الأحفوري في فاعلية أدوات خفض الانبعاثات عندما تدعم استهلاك مصادر الطاقة مرتفعة الكربون أو تؤدي إلى إبقاء أسعارها دون تكلفتها الاقتصادية والاجتماعية، فقد بلغت الإعانات المالية الصريحة للوقود الأحفوري عالمياً نحو 725 مليار دولار خلال سنة 2024، بينما قُدرت الإعانات الضمنية الناجمة أساساً عن عدم تسعير الأضرار البيئية والاجتماعية وتكاليف أخرى بنحو 6.7 تريليونات دولار، وتختلف طبيعة المبلغين محاسبياً لأن الإعانات الضمنية تمثل تقديراً للفجوة السعرية التي تشمل التكاليف الخارجية غير المحمّلة على المستهلك، وتكشف هذه المقارنة عن أهمية اتساق سياسة الدعم والطاقة مع الأهداف المناخية، إذ يؤدي استمرار الحوافز الموجهة إلى استهلاك الوقود مرتفع الانبعاثات إلى إضعاف الاستجابة للإشارات السعرية المناخية وإطالة الاعتماد على الأصول كثيفة الكربون (Black et al., 2025).

وتُعد احتمالات تسرب الانبعاثات عبر انتقال الإنتاج أو الواردات كثيفة الكربون تحدياً إضافياً للسياسات المناخية التي تُطبق بصورة متفاوتة بين الدول، وتتأثر درجة الخطر بتكلفة الكربون وحصة الطاقة في الإنتاج والانكشاف على المنافسة الدولية وسهولة نقل العمليات الصناعية، وقد دفعت هذه الاعتبارات الاتحاد الأوروبي إلى تطوير آلية تعديل حدود الكربون التي دخل نظامها النهائي حيز التطبيق في الأول من كانون الثاني 2026 وتشمل قطاعات كثيفة الانبعاثات مثل الحديد والصلب والإسمنت والألمنيوم والأسمدة والكهرباء والهيدروجين، وتستهدف الآلية إدراج تكلفة الكربون في السلع المستوردة وتعزيز الاتساق بين متطلبات الإنتاج المحلي والتجارة الخارجية، بينما تحتاج فاعليتها الفعلية في خفض الانبعاثات العالمية إلى بيانات تقييم لاحقة لمرحلة التنفيذ تسمح بتحديد أثرها في القرارات الصناعية والتجارية (European Commission, n.d.).

4. فجوة الفاعلية ومتطلبات تحقيق الأهداف المناخية الدولية

يتطلب تقييم الكفاية المناخية للسياسات ربط التخفيضات المثبتة تجريبياً بمسار الانبعاثات العالمية وبالزيادة المستقبلية في الطلب على الطاقة والنشاط الاقتصادي، فقد ارتبط انتشار التدخلات المناخية خلال العقدين الماضيين بتحقيق تخفيضات مهمة في بعض الدول والقطاعات، غير أن توزع النجاحات في نطاقات قطاعية وجغرافية محددة يحد من مساهمتها الإجمالية في تحقيق التخفيضات العالمية اللازمة، وتوضح الفجوة بين النتائج المحلية والأهداف الدولية أهمية التوسع في نطاق التدخلات الناجحة وتعزيز استمراريتها وتطوير السياسات في القطاعات التي تواجه صعوبات أكبر في

هذا العمل مرخص بموجب الاسناد/ غير تجاري/ 4.0 دولي. CC BY-NC 4.0

https://doi.org/10.61353/ma.0260441

إزالة الكربون، مع مراعاة اختلاف القدرات المالية والتكنولوجية للدول وتباين مستويات الانبعاثات التاريخية والحالية (Stechemesser et al., 2024; UNEP, 2026).

وتُظهر أحدث التقديرات الدولية استمرار الحاجة إلى تخفيضات أعمق خلال العقود المقبلة، إذ يتطلب المسار الذي يستهدف العودة إلى مستوى احترار قدره 1.5 درجة مئوية بحلول نهاية القرن خفض انبعاثات غازات الدفيئة عالمياً بنسبة 69% بحلول سنة 2040 مقارنة بمستويات سنة 2025، بينما تضع المساهمات المحددة وطنياً العالم على مسار احترار يقدر بنحو 2.6 درجة مئوية خلال القرن في حال تنفيذها بالكامل وفق الفرضيات المعتمدة في التقييم، وتكشف هذه المقارنة عن أهمية تحسين فاعلية التدخلات القائمة وتوسيع تغطيتها وتعجيل تنفيذها مع تطوير التقنيات اللازمة لمعالجة الانبعاثات المتبقية، كما توضح الحاجة إلى التمييز بين نجاح السياسة في تحقيق هدف وطني محدود ومدى مساهمتها في تلبية المتطلبات المناخية العالمية طويلة الأجل (UNEP, 2026).

وتتصل إمكانية تقليص الفجوة العالمية بتوافر شروط اقتصادية وتقنية تسمح بتعميم السياسات المثبتة ضمن بيئات مختلفة، إذ تتطلب سياسات الطاقة النظيفة بنية كهربائية قادرة على استيعاب التوليد المتغير ومصادر تمويل بتكلفة مناسبة، بينما تحتاج إزالة الكربون الصناعية إلى استثمارات كبيرة وتقنيات إنتاج متخصصة وتطوير أسواق للمنتجات منخفضة الانبعاثات، وتتأثر قدرة الاقتصادات النامية على الاستجابة بمدى توفر التمويل ونقل التكنولوجيا وبناء المؤسسات والمعلومات اللازمة لتصميم السياسات ومراقبتها، ولذلك يتطلب توسيع نطاق الأدوات الناجحة تكييف خصائصها مع السياقات المحلية واستيعاب التكاليف والمخاطر المرتبطة بالتنفيذ بدلاً من افتراض تحقق النتائج نفسها بمجرد نقل الأداة التنظيمية أو الاقتصادية (Dubash et al., 2022; OECD, 2026).

وتكشف مراجعة التقييمات التجريبية عن فجوات معرفية مؤثرة في القدرة على المقارنة الدولية، إذ تتركز نسبة كبيرة من الدراسات المتاحة في الاقتصادات الأوروبية وأمريكا الشمالية والصين وبعض الدول الصناعية الأخرى، بينما تتسم التغطية البحثية في عدد من الاقتصادات النامية والقطاعات الزراعية والأنشطة الصغيرة بدرجة أقل من الاتساع، كما تتفاوت جودة البيانات المستخدمة في قياس الانبعاثات والمخرجات الاقتصادية وتختلف مدد المتابعة اللاحقة للتطبيق، ويؤثر هذا الاختلال في القوة التفسيرية للتحليلات التلوية وإمكان تعميم نتائجها، وتبرز الحاجة إلى تطوير قواعد بيانات مفتوحة للتقييمات الوطنية والقطاعية واعتماد تصميمات سببية مناسبة ومراقبة الآثار الممتدة للسياسات ضمن مدد تسمح بظهور التغيرات التكنولوجية والاستثمارية (OECD, 2025; Zhang et al., 2026).

وتتمثل الإضافة التحليلية للمراجعة في إمكانية تقويم السياسات المناخية على أساس ثلاثة مستويات متكاملة تشمل الفاعلية السببية المقاسة والانضباط المؤسسي والاقتصادي للتنفيذ والكفاية المناخية

هذا العمل مرخص بموجب الاسناد/ غير تجاري/ 4.0 دولي. CC BY-NC 4.0

ضمن المسارات الدولية، وتساعد هذه المقاربة على تفسير الحالات التي تحقق فيها السياسات تخفيضات كبيرة داخل قطاع معين مع استمرار ارتفاع الانبعاثات الوطنية أو العالمية بفعل توسع النشاط الاقتصادي أو انتقال مصادر الانبعاثات أو محدودية التغطية، كما توفر أساساً لتحديد أولويات الإصلاح اعتماداً على مقدار التخفيض القابل للتحقق وتكلفته واستمراريته والآثار المتبادلة بين أدوات السياسة، بما يعزز إمكانية توجيه الموارد العامة والاستثمارات الخاصة نحو التدخلات التي تتوافر بشأنها أدلة تجريبية موثوقة (Döbbeling-Hildebrandt et al., 2024; OECD, 2026; UNEP, 2026).

الخاتمة

أفضت المراجعة النقدية للأدلة التجريبية إلى تحديد مجموعة من النتائج المتعلقة بقدرة السياسات المناخية على خفض الانبعاثات الكربونية وشروط تحقق هذه القدرة، إذ تبين أن الضرائب الكربونية ونظم تداول الانبعاثات والمعايير التنظيمية والحوافز الاستثمارية يمكن أن تحقق تخفيضات قابلة للقياس، مع اختلاف مستوى الفاعلية بين الأدوات والسياقات المؤسسية والاقتصادية، وتستند قوة هذا الاستنتاج إلى تكرار النتائج في عدد من الدراسات السببية والمراجعات المنهجية التي تناولت تجارب مختلفة، بينما تبقى إمكانية تعميم أحجام التخفيضات مقيدة بخصائص العينات وطرق القياس وفترات التقييم، وهو ما يستدعي التعامل مع تقديرات الأثر باعتبارها نتائج مشروطة بظروف التطبيق وليست معاملات ثابتة تصلح لجميع الحالات.

وأظهرت المقارنة القطاعية أن سرعة الاستجابة وحجم التخفيض يتأثران بطبيعة العمليات الإنتاجية وتوافر البدائل التكنولوجية والعمر التشغيلي للأصول، حيث سجل قطاع الكهرباء نتائج مهمة مرتبطة بالتسعير الكربوني والتحول في مزيج التوليد، بينما ارتبطت التخفيضات الصناعية بالاستثمار في تحديث المعدات وكفاءة الإنتاج، وتفاوت أداء سياسات النقل تبعاً لطبيعة الحوافز والسلوك الاستهلاكي وتكاليف انتشار المركبات منخفضة الانبعاثات، كما كشفت نتائج المباني والغابات عن أهمية المراقبة الممتدة والتحقق المستقل من الوفورات والتخفيضات المعلنة، وتوضح هذه الاختلافات أهمية تخصيص أدوات السياسة بحسب البنية الاقتصادية والتكنولوجية لكل قطاع وإعطاء أولوية للتقييمات التي تقيس الانبعاثات الفعلية.

وتبين أن تكامل السياسات المناخية يمثل أحد المحددات المؤثرة في تحسين نتائجها، إذ يمكن أن تسهم الحوافز الاستثمارية والمعايير التنظيمية في توسيع البدائل المتاحة للاستجابة إلى التسعير الكربوني، بينما تحد حالات التعارض بين السياسات الاقتصادية والمالية من قدرتها على تغيير القرارات الإنتاجية والاستهلاكية، كما تؤثر جودة الإنفاذ والقدرة على القياس والتحقق والعدالة التوزيعية في استمرارية التدخلات وفاعليتها، وتبرز أهمية ربط قرارات التمويل والتشريع بنتائج التقييم اللاحق للتطبيق وتطوير آليات تسمح بتعديل السياسات تدريجيا على أساس التخفيضات المحققة وتكاليفها الفعلية.

هذا العمل مرخص بموجب الاسناد/ غير تجاري/ 4.0 دولي. CC BY-NC 4.0

وتتطلب معالجة فجوة الانبعاثات العالمية توسيع السياسات الناجحة وزيادة شمولها للقطاعات والأنشطة التي تتسم بارتفاع كثافة الكربون وتطوير مصادر التمويل والتكنولوجيا والقدرات المؤسسية في الاقتصادات النامية، كما تحتاج منظومة التقييم المناخي إلى تحسين قواعد بيانات الانبعاثات وزيادة الدراسات السببية في القطاعات والدول الأقل تمثيلاً ضمن الأدبيات الحالية، وتؤكد الحصيلة العامة أن القيمة العملية للسياسات المناخية ترتبط بمقدار التخفيض الذي تحققه واستمرارية أثره وتكلفته ومدى مساهمته في المسار العالمي للتخفيف، بما يجعل التقييم التجريبي المنتظم أداة أساسية لتحسين القرارات الحكومية ورفع كفاءة الاستثمارات الموجهة لمواجهة تغير المناخ.

المصادر

1. Andersson, J. J. (2019). Carbon taxes and CO2 emissions: Sweden as a case study. American Economic Journal: Economic Policy, 11(4), 1–30. https://doi.org/10.1257/pol.20170144
2. Assunção, J., Gandour, C., & Rocha, R. (2015). Deforestation slowdown in the Brazilian Amazon: Prices or policies? Environment and Development Economics, 20(6), 697–722. https://doi.org/10.1017/S1355770X15000078
3. Assunção, J., Gandour, C., & Rocha, R. (2023). DETER-ing deforestation in the Amazon: Environmental monitoring and law enforcement. American Economic Journal: Applied Economics, 15(2), 125–156. https://doi.org/10.1257/app.20200196
4. Assunção, J., McMillan, R., Murphy, J., & Souza-Rodrigues, E. (2023). Optimal environmental targeting in the Amazon rainforest. The Review of Economic Studies, 90(4), 1608–1641. https://doi.org/10.1093/restud/rdac064
5. Best, R., Burke, P. J., & Jotzo, F. (2020). Carbon pricing efficacy: Cross-country evidence. Environmental and Resource Economics, 77(1), 69–94. https://doi.org/10.1007/s10640-020-00436-x
6. Black, S., Celniak, W., Garcia Huitron, A., Parry, I. W. H., Schulz Antipa, P., & Vernon-Lin, N. (2025). Underpriced and overused: Fossil fuel subsidies data 2025 update (IMF Working Paper No. 2025/270). International Monetary Fund. https://doi.org/10.5089/9798229034715.001
7. Carattini, S., Carvalho, M., & Fankhauser, S. (2018). Overcoming public resistance to carbon taxes. WIREs Climate Change, 9(5), Article e531. https://doi.org/10.1002/wcc.531
8. Chen, A., Daniels, W. S., Huang, Z., Ravikumar, A. P., Jordaan, S. M., Zhang, Z., Feng, L., Liu, H., Murray, L. T., Yu, X., Gaeta, D. C., Morgan, K. L., Yuan, J., & Miller, S. M. (2026). U.S. oil and gas methane emission intensity declined 2019–2024 with little indication of federal policy impact. Communications Earth & Environment, 7, Article 813. https://doi.org/10.1038/s43247-026-04039-0
9. Cincotta, C., & Thomassen, Ø. (2025). Evaluating Norway's electric vehicle incentives. Energy Economics, 146, Article 108490. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2025.108490
10. Colmer, J., Martin, R., Muûls, M., & Wagner, U. J. (2025). Does pricing carbon mitigate climate change? Firm-level evidence from the European Union emissions trading system. The Review of Economic Studies, 92(3), 1625–1660. https://doi.org/10.1093/restud/rdae055

هذا العمل مرخص بموجب الاسناد/ غير تجاري/ 4.0 دولي. CC BY-NC 4.0

11. Dechezleprêtre, A., Nachtigall, D., & Venmans, F. (2023). The joint impact of the European Union emissions trading system on carbon emissions and economic performance. Journal of Environmental Economics and Management, 118, Article 102758. https://doi.org/10.1016/j.jeem.2022.102758
12. Döbbeling-Hildebrandt, N., Miersch, K., Khanna, T. M., Bachelet, M., Bruns, S. B., Callaghan, M., Edenhofer, O., Flachsland, C., Forster, P. M., Kalkuhl, M., Koch, N., Lamb, W. F., Ohlendorf, N., Steckel, J. C., & Minx, J. C. (2024). Systematic review and meta-analysis of ex-post evaluations on the effectiveness of carbon pricing. Nature Communications, 15, Article 4147. https://doi.org/10.1038/s41467-024-48512-w
13. Dubash, N. K., Mitchell, C., Boasson, E. L., Borbor-Córdova, M. J., Fifita, S., Haites, E., Jaccard, M., Jotzo, F., Naidoo, S., Romero-Lankao, P., Shlapak, M., Shen, W., & Wu, L. (2022). National and sub-national policies and institutions. In P. R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, & J. Malley (Eds.), Climate change 2022: Mitigation of climate change (pp. 1355–1450). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157926.015
14. European Commission. (n.d.). Carbon border adjustment mechanism. https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_en
15. Fullerton, D., & Ta, C. L. (2025). What determines effectiveness of renewable energy standards? General equilibrium analytical model and empirical analysis. Journal of the Association of Environmental and Resource Economists, 12(1), 65–103. https://doi.org/10.1086/730267
16. Gillingham, K., & Stock, J. H. (2018). The cost of reducing greenhouse gas emissions. Journal of Economic Perspectives, 32(4), 53–72. https://doi.org/10.1257/jep.32.4.53
17. Goulder, L. H., & Parry, I. W. H. (2008). Instrument choice in environmental policy. Review of Environmental Economics and Policy, 2(2), 152–174. https://doi.org/10.1093/reep/ren005
18. Gugler, K., Haxhimusa, A., & Liebensteiner, M. (2023). Carbon pricing and emissions: Causal effects of Britain's carbon tax. Energy Economics, 121, Article 106655. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.106655
19. Haan, P., Santonja, A., & Zaklan, A. (2025). Effectiveness and heterogeneous effects of purchase grants for electric vehicles. Environmental and Resource Economics, 88, 185–223. https://doi.org/10.1007/s10640-024-00929-z
20. Huntington, H. G. (2024). US gasoline response to vehicle fuel efficiency: A contribution to the direct rebound effect. Energy Economics, 136, Article 107655. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2024.107655
21. International Energy Agency. (2026a). Global energy review 2026. https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2026
22. International Energy Agency. (2026b). Global methane tracker 2026. https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2026
23. International Renewable Energy Agency. (2026). Renewable power generation costs in 2025. https://www.irena.org/Publications/2026/Jul/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2025

هذا العمل مرخص بموجب الاسناد/ غير تجاري/ 4.0 دولي. CC BY-NC 4.0

24. Jacobsen, G. D., & Kotchen, M. J. (2013). Are building codes effective at saving energy? Evidence from residential billing data in Florida. The Review of Economics and Statistics, 95(1), 34–49. https://doi.org/10.1162/REST_a_00243
25. Johnstone, N., Haščič, I., & Popp, D. (2010). Renewable energy policies and technological innovation: Evidence based on patent counts. Environmental and Resource Economics, 45(1), 133–155. https://doi.org/10.1007/s10640-009-9309-1
26. Klenert, D., Mattauch, L., Combet, E., Edenhofer, O., Hepburn, C., Rafaty, R., & Stern, N. (2018). Making carbon pricing work for citizens. Nature Climate Change, 8, 669–677. https://doi.org/10.1038/s41558-018-0201-2
27. Kotchen, M. J. (2017). Longer-run evidence on whether building energy codes reduce residential energy consumption. Journal of the Association of Environmental and Resource Economists, 4(1), 135–153. https://doi.org/10.1086/689703
28. Lessmann, C., & Kramer, N. (2024). The effect of cap-and-trade on sectoral emissions: Evidence from California. Energy Policy, 188, Article 114066. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2024.114066
29. Levinson, A. (2016). How much energy do building energy codes save? Evidence from California houses. American Economic Review, 106(10), 2867–2894. https://doi.org/10.1257/aer.20150102
30. Meckling, J., Sterner, T., & Wagner, G. (2017). Policy sequencing toward decarbonization. Nature Energy, 2, 918–922. https://doi.org/10.1038/s41560-017-0025-8
31. Murray, B., & Rivers, N. (2015). British Columbia's revenue-neutral carbon tax: A review of the latest "grand experiment" in environmental policy. Energy Policy, 86, 674–683. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.08.011
32. Mustafa, M. (2026). Welfare effects, carbon abatement costs, and market impacts of EV subsidies in Norway. Energy Economics, 157, Article 109218. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2026.109218
33. OECD. (2025). The effects of climate policies on emissions: Evidence from a comprehensive and systematic review of the ex-post empirical literature (Inclusive Forum on Carbon Mitigation Approaches Papers No. 7). OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/ec1f7f0d-en
34. OECD. (2026). What makes climate change mitigation policies work? A meta-analysis of the empirical literature on policy effectiveness (Inclusive Forum on Carbon Mitigation Approaches Papers No. 11). OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/642fbefe-en
35. Stechemesser, A., Koch, N., Mark, E., Dilger, E., Klösel, P., Menicacci, L., Nachtigall, D., Pretis, F., Ritter, N., Schwarz, M., Vossen, H., & Wenzel, A. (2024). Climate policies that achieved major emission reductions: Global evidence from two decades. Science, 385(6711), 884–892. https://doi.org/10.1126/science.adl6547
36. Swinfield, T., Williams, A., Coomes, D., Dales, M., Ferris, P., Guizar-Coutiño, A., Hartup, J., Holland, J., Jaffer, S., Jones, J. P. G., Lam, M. O. K., Keshav, S., Madhavapeddy, A., Toye-Scott, E., West, T. A. P., & Balmford, A. (2026). Learning lessons from over-crediting to ensure additionality in forest carbon credits. Nature Communications, 17, Article 3944. https://doi.org/10.1038/s41467-026-71552-3

هذا العمل مرخص بموجب الاسناد/ غير تجاري/ 4.0 دولي. CC BY-NC 4.0

37. United Nations Environment Programme. (2026). Emissions gap report 2026: The point of return. https://doi.org/10.59117/20.500.11822/50038
38. West, T. A. P., & Fearnside, P. M. (2021). Brazil's conservation reform and the reduction of deforestation in Amazonia. Land Use Policy, 100, Article 105072. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.105072
39. West, T. A. P., Wunder, S., Sills, E. O., Börner, J., Rifai, S. W., Neidermeier, A. N., Frey, G. P., & Kontoleon, A. (2023). Action needed to make carbon offsets from forest conservation work for climate change mitigation. Science, 381(6660), 873–877. https://doi.org/10.1126/science.ade3535
40. Wilde, S. E., Tyner, D. R., & Johnson, M. R. (2025). The efficacy of methane leak detection and repair (LDAR) programs in practice. ACS ES&T Air, 2(11), 2527–2536. https://doi.org/10.1021/acsestair.5c00195
41. World Bank. (2026). State and trends of carbon pricing 2026. https://doi.org/10.1596/978-1-4648-2348-0
42. Wu, L., Liu, G., Huang, Z., Meng, J., & Zhou, Y. (2026). Cross-national comparative assessment of synergies and conflicts in climate policy mixes. Nature Climate Change, 16, 441–450. https://doi.org/10.1038/s41558-026-02574-4
43. Zhang, W., Sovacool, B. K., & Cleveland, C. (2026). Do decarbonization policies work? Evidence from a global meta-analysis. Energy Economics, 154, Article 109145. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2026.109145

هذا العمل مرخص بموجب الاسناد/ غير تجاري/ 4.0 دولي. CC BY-NC 4.0