أ.د. نجلاء حرب
أستاذ الاقتصاد بجامعة الإسكندرية
مدير مركز العلاقات الاقتصادية الدولية السابق – معهد التخطيط القومى

البصمة الكربونية: المفهوم والقياس

Carbon Footprint: Concept and Measurement

مقدمة :

فى مواجهة التحدى المتصاعد لتغير المُناخ، يتنامى الوعى العالمى بتأثير الأنشطة البشرية فى البيئة. ومن بين المؤشرات الحاسمة التى تسلط الضوء على هذا التأثير تبرُز «البصمة الكربونية» كمقياس أساسى لفهم حجم انبعاثات الغازات الدفيئة، التى تشمل ثانى أكسيد الكربون والميثان وأكسيد النيتروز ومركبات الكربون الفلورية الأخرى، الناجمة عن الأنشطة البشرية المختلفة بهدف تطوير استراتيجيات فعالة للحد من ظاهرة الاحتباس الحرارى إلى ١,٥ درجة مئوية وتحقيق الحياد الكربونى، على النحو الموصى به من قبل الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المُناخ *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* واتفاقية باريس ٢٠١٥م.

وعلى مدى السنوات القليلة الماضية، شهد مصطلح «البصمة الكربونية» انتشارًا واسعًا نظرًا لأهميته المُلحَّة. ولم يعُد هذا المصطلح مقتصرًا على وسائل الإعلام، بل أصبح جزءًا لا يتجزأ من لغة الأعمال والحكومات. ومع ذلك، يظل السؤال قائمًا: ما هو المعنى الحقيقى لمصطلح «**البصمة الكربونية**»؟ وهو ما سوف نتعرف عليه فيما يلى.

١ - مفهوم البصمة الكربونية :

يُعد مصطلح «**البصمة الكربونية**» مفهومًا حديثًا نسبيًا، وقد تطور كجزء من مفهوم أوسع وهو «**البصمة الأيكولوجية**»، وبينما تقيس البصمة الأيكولوجية تأثير استهلاك الفرد أو المجتمع على البيئة من حيث استخدام الموارد الطبيعية وقدرة الأرض على استيعاب النفايات، فإن البصمة الكربونية تركز بشكل محدود على قياس انبعاثات الغازات الدفيئة التى تُسهم فى تغير المُناخ. وقد تمت صياغة مصطلح «البصمة الكربونية» لأول مرة عام ١٩٩٢م من خلال ويليام ريس وماثيس واكرناجل *Rees & Wackernagel*. وذلك بهدف توفير أداة لقياس تأثير الأنشطة المختلفة على انبعاثات الغازات الدفيئة، ومن ثم تحديد المسئولية عن هذه الانبعاثات وتطوير استراتيجيات للحد منها[١].

و لقد تم تعريف البصمة الكربونية بأكثر من اتجاه وفقًا لتركيز الاهتمام، وتتمحور الفروق بشكل أساسى حول قضيتين رئيسيتين: وحدات القياس ونطاق القياس[٢]. ومن أهم هذه التعريفات:

تعريف الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المُناخ *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* والذى يتبنى تعريف ويدمان ومينكس *(Wiedmann and Minx, 2008)* ويركز على شمولية مصادر الانبعاثات، حيث يعرفها بأنها «مقياس لإجمالى كمية انبعاثات ثانى أكسيد الكربون (CO_2) الحصرية، التى تَنتُج بشكل مباشر وغير مباشر عن نشاط ما، أو التى تتراكم خلال مراحل حياة منتج ما»[٣].

كما قدَّم مركز الأنظمة المستدامة بجامعة ميتشجن *Center for Sustainable Systems, University of Michigan* تعريفًا دقيقًا وشاملاً للبصمة الكربونية، مع التركيز على أهمية القياس الموحَّد وتقييم دورة الحياة الكاملة حيث يعرفها على أنها «إجمالى انبعاثات غازات الاحتباس الحرارى *Greenhouse Gas (GHG)* الناتجة بشكل مباشر وغير مباشر عن فرد أو منظمة أو حدث أو منتج.

يتم حسابها عن طريق جمع الانبعاثات الناتجة عن كل مرحلة من مراحل عمر المنتَج أو الخدمة (إنتاج المواد، التصنيع، الاستخدام، ونهاية العمر). فخلال دورة حياة المنتَج، قد تنبعث غازات الاحتباس الحرارى مثل ثانى أكسيد الكربون (CO_2) والميثان (CH_4) وأكسيد النيتروز (N_2O). ويتم أخذ الاختلافات فى احتباس الحرارة فى الاعتبار بواسطة القدرة على إحداث الاحترار العالمى *Global Warming Potential (GWP)* لكل غاز، ما يؤدى إلى بصمة كربونية بوحدات كتلة مكافئات ثانى أكسيد الكربون (CO_2e)»[٤].

وبناءً على التعريفات المختلفة يمكننا وضع تعريف شامل للبصمة الكربونية على أنها:

«مقياس شامل لإجمالى انبعاثات الغازات الدفيئة، مثل ثانى أكسيد الكربون والميثان وأكسيد النيتروز ومركبات الكربون الفلورية، الناتجة عن الأنشطة البشرية الفردية والمؤسسية، أو المتعلقة بمنتجات أو خدمات أو أحداث. يتم التعبير عن هذه الانبعاثات بوحدات مكافئ ثانى أكسيد الكربون (CO_2e)، مع مراعاة دورة حياة المنتَج أو الخدمة وجميع مصادر الانبعاثات المباشرة وغير المباشرة، بهدف تحديد تأثير الأنشطة المختلفة على تغير المُناخ وتطوير استراتيجيات للحد من هذه الانبعاثات». ويوضح الشكل رقم (١) أهم أنواع البصمة الكربونية.

شكل رقم (١) : أنواع البصمة الكربونية

٢- قياس البصمة الكربونية:

تتنوع أساليب ومناهج قياس البصمة الكربونية تبعًا لمستوى التفصيل والدقة المطلوبين. ويمكن توضيح أهمها فيما يلى[٥]:

- تطبيقات الحسابات البسيطة للأفراد والمنظمات الصغيرة:

تعتمد هذه الطريقة على استخدام حاسبات البصمة الكربونية المتاحة عبر الإنترنت، استنادًا إلى بيانات تقديرية حول الاستهلاك والأنشطة المختلفة، مثل استهلاك الكهرباء، ونوع السيارة ومعدل استخدامها، والنظام الغذائى. وتتميز بسهولة الاستخدام، ولكنها قد لا تكون دقيقة بنسبة ١٠٠٪.

- تحليل دورة الحياة:
Life Cycle Assessment (LCA)

يُعَد تحليل دورة الحياة نهجًا أكثر شمولية ودقة، حيث يتم تقييم الانبعاثات الناتجة عن منتج أو خدمة ما طوال دورة حياتها، بدءًا من استخراج المواد الخام وحتى التخلص منها. ويتطلب هذا التحليل جمع بيانات تفصيلية حول استهلاك الطاقة والمواد فى كل مرحلة، بالإضافة إلى استخدام أدوات وبرامج متخصصة لنمذجة وحساب الانبعاثات. ويُستخدم بشكل واسع فى الصناعات، ولكنه يُعَد مكلفًا نسبيًّا ويحتاج إلى خبراء متخصصين.

- بروتوكول غازات الاحتباس الحرارى:
(GHG Protocol)

يُعد بروتوكول غازات الاحتباس الحرارى إطارًا معياريًّا دوليًّا لحساب وتقديم تقارير عن انبعاثات غازات الاحتباس الحرارى. ويقسم البروتوكول الانبعاثات إلى ثلاثة نطاقات رئيسية: **النطاق (١)** (الانبعاثات المباشرة) عن مصادر مملوكة أو خاضعة للرقابة المباشرة للمؤسسة، و**النطاق (٢)**

(الانبعاثات غير المباشرة من الطاقة) المشتراة والمستهلكة من قبل المؤسسة، و**النطاق (٣)** (الانبعاثات غير المباشرة الأخرى) فى سلسلة القيمة الخاصة بالمؤسسة. ويتطلب تطبيق هذا البروتوكول درجة عالية من التخصص[٦].

- تحليل المُدخلات والمُخرجات:
(Input-Output Analysis)

وهو أسلوب اقتصادى يُستخدم لتقدير الانبعاثات بناءً على البيانات الاقتصادية (مثل الإنفاق والإنتاج) لتحليل العلاقات بين القطاعات الاقتصادية. و يتم ربط الانبعاثات بكل قطاع اقتصادى بناءً على متوسطات الصناعة.

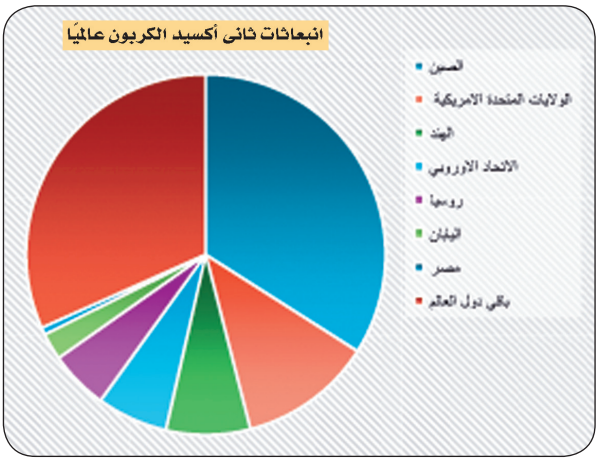
٣- البصمة الكربونية للدول والأفراد

يُعد التمييز بين البصمة الكربونية (الاستهلاكية) والانبعاثات الوطنية للدول أمرًا بالغ الأهمية لتحديد المسئولية الحقيقية عن انبعاثات الغازات الدفيئة. ويمكن توضيح الفرق بينهما على النحو الآتى[٧]:

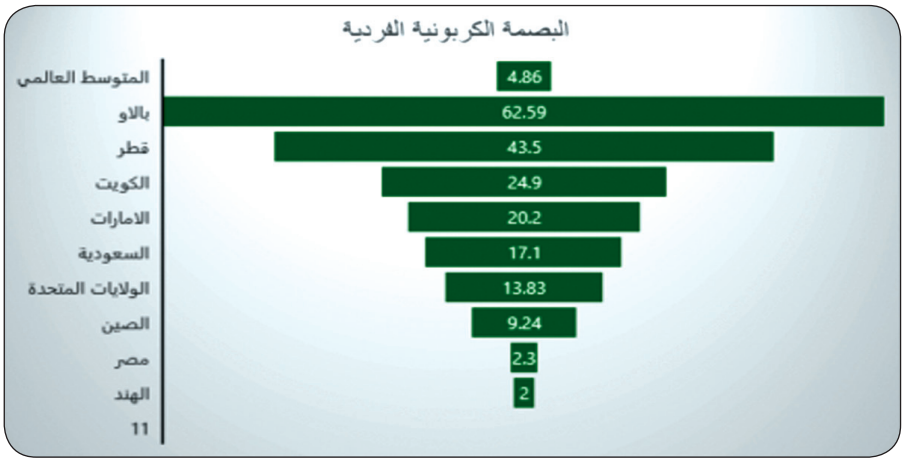
الانبعاثات الوطنية: تقيس انبعاثات الغازات الدفيئة الناتجة عن الأنشطة الإنتاجية التى تحدُث داخل حدود الدولة. وتلتزم الدول بتقديم تقارير دورية حول انبعاثاتها من الغازات الدفيئة وفقًا لاتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغيُّر المُناخ، وتُعرف هذه التقارير بـ «البلاغات الوطنية».

البصمة الكربونية (الاستهلاكية): تقيس انبعاثات الغازات الدفيئة المرتبطة باستهلاك السلع والخدمات، بغض النظر عن مكان إنتاجها، سواء كانت منتجة محليًّا أو مستوردة. وبالتالى، تتسع لتشمل الانبعاثات المرتبطة بالنقل والشحن الدوليين. وقد تزيد البصمة الكربونية لدولة ما حتى مع انخفاض انبعاثاتها المحلية بسبب استيرادها السلع، ما يسلط الضوء على مسئولية الدول المستهلكة.

وبوجه عام، تتفاوت الانبعاثات والبصمة الكربونية بين الدول بشكل كبير، حيث تميل الدول المتقدمة لتسجيل معدلات أعلى نظرًا لاعتمادها على الصناعات الكثيفة الطاقة وارتفاع استهلاك الفرد. ووفقًا لأحدث البيانات المتاحة عالميًّا لعام ٢٠٢٣م، تتصدر ثلاث دول قائمة الدول الأكثر إطلاقًا للانبعاثات الكربونية، حيث تُسهم مجتمعة بأكثر من نصف إجمالى الانبعاثات العالمية. وتأتى الصين فى الصدارة بنسبة ٣٣,٩٨٪ من إجمالى الانبعاثات الكربونية العالمية، تليها الولايات المتحدة بنسبة ١٢٪، وتحتل الهند المرتبة الثالثة بنسبة ٧,٥٧٪. كما تُسهم دول أخرى بنسب عالية، مثل الاتحاد الأوروبى (٦,٤٪) وروسيا (٥,٣٪) واليابان (٢,٤٢٪). أما مصر، فتُسهم بنسبة ٠,٦٤٪ من الانبعاثات العالمية، كما هو موضح فى الشكل رقم (٢)[٨].



شكل رقم (٢) : التوزيع العالمى لانبعاثات ثانى أكسيد الكربون فى عام ٢٠٢٣م



**شكل رقم (٣)
أعلى الحصص الفردية
من البصمة الكربونية
عام ٢٠٢٣م**

أما على صعيد الانبعاثات الفردية، فتتصدر دول الخليج العربى القائمة بسبب ارتفاع إنتاج واستهلاك الوقود الأحفورى وأنماط الاستهلاك المرتفعة للمنتجات المستوردة. بينما تُعد الانبعاثات الفردية فى مصر أقل من المتوسط العالمى. كما هو موضح فى الشكل رقم (٣).

وتجدرالإشارة إلى أن نسب الانبعاثات الكربونية تتسم بالديناميكية والتغير المستمر، حيث تتأثر بعوامل حاسمة كالتطورات التكنولوجية فى مجالات الطاقة النظيفة وكفاءة الاستهلاك، والتغيرات فى أنماط الاستهلاك الفردى والمجتمعى نحو الاستدامة. كما تلعب السياسات الحكومية دورًا محوريًّا من خلال تعزيز التحول إلى مصادر الطاقة المتجددة، وتطبيق إجراءات فعالة لخفض الانبعاثات الكربونية، وتشجيع الاستثمار فى المشروعات الخضراء. وعليه، فإن المسار المستقبلى للانبعاثات العالمية يرتبط ارتباطًا وثيقًا بوتيرة تبنِّى هذه التطورات ومدى فاعلية السياسات الحكومية الطموحة فى مواجهة تحديات تغير المُناخ.

الهوامش :

(1) Rees, W, E.& Wackernagel, M, Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth, 1996, New Society Publishers, Gabriola Island, Canada.

(2) Wright, L. A., Kemp, S., & Williams, I., Carbon Footprinting': Towards a Universally Accepted Definition. 2011, Carbon Management, 2(1), pp. 61–72. https://doi.org/10.4155/cmt.10.39 (20Mar.2025)

(3) Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, Glossary https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_Annex-II.pdf (25Mar.2025)

- Wiedmann, T., & Minx, J., A Definition of 'Carbon Footprint'. In Carbon Footprint and Input-Output Analysis, 2008, Nova Science Publishers, NY, USA, pp. 1–11

(4) Center for Sustainable Systems, University of Michigan, Carbon Footprint Factsheet, 2024, Pub. No. CSS09-05. https://css.umich.edu/publications/factsheets/sustainability-indicators/carbon-footprint-factsheet (17Mar.2025)

(5) International Organization for Standardization (ISO), Carbon Footprint: Measuring and Reducing our Environmental Impact https://www.iso.org/renewable-energy/carbon-footprint (25Mar.2025)

(6) GHG Protocol https://ghgprotocol.org/(22Mar.2025)

(7) Berners-Lee, M., The Carbon Footprint of Everything. 2022, Greystone Books. Canada https://www.perlego.com/book/3234343/the-carbon-footprint-of-everything-pdf / (20Mar.2025)

-Mózner, Z. V., A Consumption-based Approach to Carbon Emission Accounting – Sectoral Differences and Environmental Benefits. 2013, Journal of Cleaner Production, 42, pp.83-95

(8) World Population Review, Carbon Footprint by Country 2025 https://worldpopulationreview.com/country-rankings/carbon-footprint-by-country (2 Apr. 2025)