IJTHS
The International Journal of Tourism and Hospitality Studies, O6U

أثر البصمة الكربونية في الاستدامة البيئية: الدور الوسيط لتقنيات الذكاء الاصطناعي بالتطبيق على مطار القاهرة الدولي

رشا أحمد محمد خليل[1] ريهام عبد الرحمن جاد[2]

[1،2]كلية السياحة والفنادق– جامعة قناة السويس– جمهورية مصر العربية

معلومات المقالة

الكلمات المفتاحية:

البصمة الكربونية، الاستدامة البيئية، الذكاء الاصطناعي، استدامة المطارات، مطار القاهرة الدولي.

(IJTHS), O6U

المجلد8، العدد 2، ابريل 2025

ص 246 –260

تاريخ الاستلام: 2025/4/1

تاريخ القبول: 2025/4/30

تاريخ النشر : 2025/5/15

الملخص

يسلط البحث الحالي الضوء على تأثير البصمة الكربونية في تحقيق الاستدامة البيئية في مطار القاهرة الدولي، ويستكشف دور تقنيات الذكاء الاصطناعي في تعزيز هذه العلاقة، من خلال توزيع 400 استمارة إلكترونية على العاملين في المطار، تم الحصول على 354 استمارة صالحة للتحليل الإحصائي. أظهرت نتائج نمذجة المعادلات الهيكلية أن البصمة الكربونية تؤثر تأثيراً معنوياً على الاستدامة البيئية، وأن تقنيات الذكاء الاصطناعي تلعب دورًا وسيطًا في تقليل آثار البصمة الكربونية. يوصي البحث بضرورة استخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي لتحسين كفاءة المطارات وتقليل الانبعاثات الكربونية، مع تعزيز التعاون بين الجهات المعنية وزيادة الوعي المجتمعي بأهمية الاستدامة. يمكن تحقيق ذلك من خلال إنشاء نظام لمراقبة الانبعاثات الكربونية، واستخدام مصادر الطاقة المتجددة، وتشجيع السلوكيات المستدامة بين المسافرين والمجتمعات المحلية.

مقدمه:

يمثل قطاع الطيران محركًا أساسيًا للنمو الاقتصادي والتواصل العالمي، إلا أنه يواجه تحديًا بيئيًا كبيرًا يتمثل في مساهمته في الانبعاثات الكربونية وظاهرة الاحتباس الحراري. أطلقت وزارة الطيران المدني المصرية في إطار سعيها لتحقيق التنمية المستدامة ورؤية مصر 2030، أول رحلة تجارية بوقود الطيران المستدام (SAF) من باريس إلى شرم الشيخ، بالتعاون مع شركة Neste العالمية الرائدة في هذا المجال **(وزارة الطيران المدني المصري ،2025)**. مع التوسع المستمر في حركة السفر الجوي، أصبحت البصمة الكربونية للمطارات محل اهتمام كبير من المسؤولين حيث تسعى المطارات جاهدة لتبني استراتيجيات تعزز من استدامتها وتقلل من انبعاثات وقود الطائرات والمعدات الأرضية، بالإضافة إلى خفض استهلاك الطاقة الهائل وتحسين إدارة النفايات والبنية التحتية **(Air Transport Association, 2025)**.

وتعتبر تقنيات الذكاء الاصطناعي (AI) أداة محورية لتقليل الأثر السلبي لقطاع الطيران على البيئة وتحقيق الاستدامة البيئية في المطارات حيث يمتلك الذكاء الاصطناعي القدرة على تحليل كميات هائلة من البيانات المعقدة، اكتشاف الأنماط الجديدة، وتحسين عملية اتخاذ القرارات(**Graham, 2014 ; Chandel&Arora,2025**)

تهدف هذه الدراسة إلى استكشاف أثر البصمة الكربونية للمطارات على تحقيق الاستدامة البيئية، مع التركيز على الدور الوسيط الذي تلعبه تقنيات الذكاء الاصطناعي في هذه العلاقة وكيف يمكن لهذه التقنيات المساهمة في مواجهة التحديات البيئية، مما يساعد على صياغة استراتيجيات مستقبلية تضمن مستقبلًا أقل انبعاثًا للكربون وأكثر استدامة لقطاع الطيران. وقد تم اختيار مطار القاهرة الدولي، نظرًا لكونه الأكثر ازدحامًا في مصر، حيث ارتفع عدد الركاب والرحلات الجوية بنسبة 9% في عام 2024 مقارنة بعام 2023. هذا يشير إلى أن لديه أكبر بصمة كربونية يمكن قياسها ومحاولة تحسينها. فمطار القاهرة الدولي يمتلك كميات كبيرة من البيانات المتعلقة بحركة الطائرات والركاب، استهلاك الطاقة، وإدارة النفايات، وهي بيانات يمكن للذكاء الاصطناعي تحليلها بدقة لتقدير البصمة الكربونية. يسعى المطار حاليًا لتطوير منظومته وتقليل بصمته الكربونية بهدف الحصول على شهادة الأيزو 14001 الخاصة بالبيئة، مما يؤكد اهتمامه بتحقيق الاستدامة البيئية **(وزارة الطيران المدني المصري ،2025)**،وتعد البصمة الكربونية لقطاع الطيران هي البؤرة الأساسية لانبعاثات الغازات الدفينة الناتجة عن حركة الطائرات ونقل الركاب والبضائع وغيرها من العمليات التشغيلية التي تمثل خطراً جسيماً يهدد البيئة ويعوق استدامتها**(Carbonbrief ,2025)**، وعلى الرغم من الدور الهائل الذي يلعبه الذكاء الاصطناعي في تحسين كفاءة إدارة البيئة، إلا أنه لايزال هناك قصور في كل من الفهم العام والشامل بمفهوم الذكاء الاصطناعي فضلاً عن البصمة الكربونية الناتجة عنه ذاته، وعدم الفهم للدور الوسيط الذي يلعبه بين أبعاد البصمة الكربونية وتحقيق أهداف الاستدامة البيئية في المطارات خاصة مطار القاهرة الدولي باعتباره الأكثر ازدحاماً في مصر وأفريقيا. وهذا يعني زيادة الانبعاثات الكربونية مما يفرض التوجه إلى تبني استخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي لتحقيق أهداف الاستدامة وتقليل البصمة الكربونية. ومن هنا يمكن صياغة التساؤل البحثي فيما يلي: إلى أي مدى تؤثر تقنيات الذكاء الاصطناعي في تقليل البصمة الكربونية وتحقيق الاستدامة البيئية في مطار القاهرة الدولي؟

الإطار النظري:

مفهوم البصمة الكربونية:

البصمة الكربونية هي مقياس للتأثير البيئي من حيث كمية انبعاثات ثاني أكسيد الكربون (CO_2) وغيرها من الغازات الدفيئة التي تطلق في الغلاف الجوي الناجمة عن الأنشطة البشرية وغير البشرية، ويهدف مفهوم البصمة الكربونية إلى توفير السبل التي تمكن من قياس وتقدير أثر الأنشطة البشرية على تغير المناخ **(كحلة وحموده،2024)**.

وتشير الدراسات إلى أن الغازات الدفينة هي المسبب الأساسي لظاهرة الاحتباس الحراري وعوامل التغير المناخي والتي تؤثر سلبا على البيئة كارتفاع درجات الحرارة و ذوبان الأنهار الجليدية وارتفاع مستوى سطح البحر، الفيضانات ، الجفاف وحرائق الغابات بالإضافة إلى فقدان التنوع البيولوجي مما يؤدي إلى حدوث خلل في التوازن البيئي وفقدان الموائل البيئية وانقراض فصائل مختلفة من الحيوانات،**(عبد العزيز ،2023)**،وبالرغم من أن قطاع الطيران محور أساسي في شبكة النقل العالمية، إلا أنها مصدر رئيسي للانبعاثات الكربونية ،لذا تعمل المطارات وقطاع الطيران بشكل عام على تبني معايير تحقيق الاستدامة البيئية وتوسيع مفهوم البصمة الكربونية وإزالة الكربون من المطارات **Tunley environmental, (2024; Wang et al., 2024)**.

الاستدامة البيئية واستدامة المطارات:

الاستدامة البيئية تعني القدرة على الحفاظ على التوازن الطبيعي للبيئة مع استمرارية الحفاظ على الموارد الطبيعية وذلك من أجل ضمان رفاهية مستقبل الأجيال الحالية والمستقبلية مما يعني استخدام الموارد بطريقة صحيحة ومسؤولة وتقليل التلوث وحماية النظام البيئي **(عبد القادر وآخرون،2021؛ عبد العزيز،2023)**، وتعتبر الاستدامة البيئية من أهم ركائز التنمية المستدامة الثلاث البيئية، الاقتصادية والاجتماعية **(يدك،2019)**، والتي تتطلب ترشيد استهلاك الموارد الطبيعية كالماء والطاقة والمواد الخام والحفاظ على التنوع البيولوجي وتقليل معدل تلوث الهواء والماء والتربة بالإضافة إلى الحد من الانبعاثات الكربونية الناتجة من الغازات الدفينة التي تتسبب في تغير المناخ **(Su et al., 2018)** ،وتعطي المطارات المستدامة الأولوية لاعتماد مصادر الطاقة المتجددة، مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والطاقة الحرارية الأرضية، لتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري. الاستثمار في الألواح الشمسية وتوربينات الرياح وغيرها من تقنيات الطاقة المتجددة لتوليد الكهرباء اللازمة لعمليات المطارات والتي ستقلل من انبعاثات الكربون وتكاليف الطاقة **(محمد،2023)**، ومع استمرار نمو السفر الجوي العالمي، تبرز الحاجة الماسة إلى تعزيز الاستدامة البيئية في المطارات. فالمطارات، رغم كونها محركات اقتصادية رئيسية، تُشكّل أيضًا مصادر كبيرة للآثار البيئية السلبية. لذا، يصبح تطبيق ممارسات مستدامة ضروريًا لتقليل هذه الآثار وضمان استدامة قطاع الطيران على المدى البعيد **(فرحات والعزازي،2024؛Sreenath et al.,2021)**، وتُسلط الدراسات الحديثة الضوء على أهمية دور المطارات في تعزيز الاستدامة البيئية من خلال عدة مجالات رئيسية. منها يجب على المطارات اعتماد منهجيات شاملة لتقييم الاستدامة**(Tarsem & Huzaifa, 2024)** ، كما يُعد المشاركة في برنامج اعتماد الكربون للمطارات التابع للمجلس الدولي للمطارات (ACI) خطوة هامة لإثبات الالتزام بالاستدامة. هذا البرنامج يُوفر نهجاً مُنظماً وشفافاً للحد من البصمة الكربونية. بالإضافة إلى ذلك، يمكن للمطارات تحسين الخدمات اللوجستية والعمليات، وإصلاح عمليات مناولة البضائع لتقليل استهلاك الطاقة والانبعاثات. من خلال تطبيق هذه الإجراءات، يمكن للمطارات تعزيز الاستدامة البيئية وتحقيق الحياد الكربوني**(Airports Council International ,2024)**.

البصمة الكربونية والاستدامة البيئية

العلاقة بين البصمة الكربونية والاستدامة البيئية علاقة مباشرة وعكسية، فالعمل على تقليل البصمة الكربونية هو مؤشر رئيسي لتحقيق الاستدامة، فكلما زاد معدل البصمة الكربونية، زاد التأثير السلبي على البيئة وقلت فرص تحقيق الاستدامة وعلى العكس، كلما زادت الجهود نحو خفض معدل الانبعاثات الكربونية أدى ذلك إلى التخفيف من التغيرات المناخية، وتحسين كفاءة استخدام الطاقة والموارد، وتحسين جودة البيئة مما يشير إلى تقليل انبعاثات الملوثات الأخرى والذي بدوره يحسن جودة الهواء والماء بالإضافة إلى أن النظم البيئية الأقل تأثرًا بالتغيرات المناخية تكون لديها القدرة بشكل أكبر على التكيف مع التحديات البيئية **(مركز المعلومات ودعم اتخاذ القرار ،2025)**،وهناك مصادر متعددة للبصمة الكربونية في المطارات مثل انبعاثات الطائرات سواء خلال عمليات الإقلاع والهبوط، استهلاك الطاقة في المباني كالإضاءة، التدفئة، وتشغيل المعدات داخل منشآت المطار بأنواعها وغيرها، نقل الركاب والبضائع تتمثل في نقل الركاب من وإلى المطار، وغيرها من مركبات الشحن، والأجهزة والمعدات الأرضية، وإدارة النفايات والتي تشمل عمليات جمع ومعالجة نفايات ومخلفات المطار .ولذلك تتأثر تحقيق الاستدامة السياحية البيئية في الوجهات المحيطة بالمطار، حيث يمكن أن تؤثر الممارسات غير المسئولة على جاذبية الوجهة السياحية، ومن هنا يبرز دور الذكاء الاصطناعي ومدى مساهمته في التخفيف من آثار البصمة الكربونية**(Wang et al.,2024)**.

تقنيات الذكاء الاصطناعي التي تساهم في خفض البصمة الكربونية واستدامة المطارات

برزت تقنيات الذكاء الاصطناعي في الآونة الأخيرة بشكل ملحوظ في دراسة الظواهر البيئية ودورها المحوري في تمكين المطارات وتوجيه المسئولين في تبني استخدام هذه التقنيات وذلك لتحقيق أهداف الاستدامة البيئية وخفض معدل البصمة الكربونية وآثارها السلبية ومن هذه التقنيات ما يلي:

-تحسين كفاءة العمليات التشغيلية مثل إدارة الحركة الجوية والمسارات حيث يستطيع الذكاء الاصطناعي أن يقوم بتحليل كميات كبيرة من البيانات المعقدة الخاصة بالطيران كالطقس، حركة المرور وسعة المدرج للتأكد من سلامة مسارات الطائرات، وترشيد استهلاك الطاقة والوقود وتقليل مدة الانتظار سواء جواً أو أرضا(**Tarsem & Huzaifa, 2024**)، تحسين استخدام الوقود حيث يمكن للذكاء الاصطناعي أن يحدد كمية الوقود المناسبة التي يجب أن تحملها الطائرات لكل رحلة تقوم بها، مع مراعاة الوزن والمسافة والطقس، لتجنب حمل الطائرة وقود زائد مما يزيد من الوزن ويستهلك قدر أكبر من الطاقة، بالإضافة إلى تحسين تخصيص بوابات الطائرات ومواقع التوقف لتقليل المسافات التي تقطعها الطائرات على الأرض باستخدام محركاتها بهدف ترشيد الاستهلاك بالإضافة إلى الصيانة التنبؤية حيث يمكن التنبؤ بأعطال المعدات قبل حدوثها من خلال استخدام خوارزميات الذكاء الاصطناعي، مما يضمن كفاءة المعدات وترشيد الطاقة والموارد ; **(Al- Taee & Al- Turjman, 2020Pampuri & Zanin ,2021)**

- إدارة الطاقة الذكية مثل استخدام أنظمة الإضاءة والتكييف الذكية حيث يستطيع الذكاء الاصطناعي أن يتحكم في أنظمة الإضاءة والتكييف داخل المنشآت الملحقة بالمطار على حسب مستويات الإضاءة الطبيعية والظروف الجوية، تحسين استهلاك الكهرباء من خلال القيام بتحليل استهلاك الطاقة وكيفية تحسين كفاءتها من خلال العمل بمصادر الطاقة المتجددة كالطاقة الشمسية (**Ngo & Kim, 2021; Rafaat et al. ,2023**).
- تحسين إدارة النفايات وذلك من خلال فرز النفايات وتتبعها فالذكاء الاصطناعي يتمكن من فرز النفايات بشكل آلي، وتتبع مصادرها، كما يقدم حلول لكيفية إعادة تدويرها مما يساهم في تقليل كميات انتاج النفايات من المصدر **(Gilang et al., 2023)**، وتحديد أولويات الصيانة من خلال وضع خطط تساهم في تحسين أدائها وتحديد الأجهزة التي تستهلك قدرة كبير من الطاقة وإمكانية استبدالها بأخرى(**Nangyala et al., 2024**) .
- التعزيز من تجربة المسافرين المستدامة وذلك من خلال توجيه المسافرين واختيار أسرع الطرق كفاءة وأقلها ازدحاما للانتقال داخل المطار بهدف تقليل مدة الانتظار واستهلاك الطاقة المتعلقة بتشغيل الأنظمة، بالإضافة إلى توفير معلومات عن اختيارات السفر المستدام وتوجيه المسافرين نحو استخدام وسائل النقل العام، وكيفية تعويض البصمة الكربونية في الرحلات التي يقومون بها بالإضافة إلى نمذجة وتحليل البيانات حيث يمكن قياس البصمة الكربونية بدقة وذلك من خلال تبنى استخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي والذي تقوم بتحليل كميات طائلة من البيانات وذلك لتقدير البصمة الكربونية الخاصة بالمطارات بالإضافة إلى تحديد مصادر الانبعاثات الكربونية، مما يساعد في وضع حلول فعالة لخفضه **(Zhu et al. ,2021)** والتنبؤ بالانبعاثات وبناء نماذج تنبؤية لمقدار الانبعاثات الكربونية المستقبلية على حسب حجم الحركة الجوية، مما يمكن المطار بالقيام باتخاذ التدابير الوقائية والاستعداد(**Daniel et al. ,2023**)

التحديات والفرص التي تواجه المطارات بهدف تقليل بصمتها الكربونية:

تواجه صناعة الطيران تحديات كبري في سعيها نحو تحقيق الأهداف المناخية وذلك وفقًا لتقرير الصادر من قبل الأمم المتحدة، فمن المفترض أن تساهم تلك الصناعة في خفض معدل بصمتها الكربونية بنسبة 12% من مستويات عام 2019

وذلك ضمانا لعدم تجاوز ارتفاع درجة الحرارة العالمية فيما يتراوح من 1.5–2 درجة مئوية وذلك بحلول عام 2050، وفي حالة عد القدرة علي التخفيض فإن النسبة المطلوبة سوف ترتفع إلي ما يقرب من 27% **(Carbonbrief, 2025)**.

ومن أبزر هذه التحديات التكاليف المرتفعة للتكنولوجيا الخضراء: يتطلب الاستثمار في الطاقة المتجددة والمركبات الكهربائية وأنظمة الإضاءة الموفرة للطاقة وغيرها من التقنيات المخصصة لمعالجة النفايات تكاليف مرتفعة جداً، حيث تُعد المطارات مستهلكًا كبيرًا للطاقة نظرًا لتشغيل المحطات، والإضاءة، والتدفئة، والتبريد، وخدمات النقل البري. ويشكل تحقيق التوازن بين الطلب على العمليات كثيفة الاستهلاك للطاقة والحاجة إلى خفض انبعاثات الكربون تحديًا كبيرًا للمطارات المستدامة،**(Diogo,2024)** ،صعوبة قياس ومراقبة الانبعاثات بشكل دقيق: يصعب ايجاد حلول متكاملة لهذه المشكلة حيث يتطلب ذلك تحديد مصادر الانبعاثات المختلفة كالطائرات والمركبات الأرضية والتدفئة والتبريد وغيرها، كما يصعب قياسها نظرا لاحتياجها لأنظمة متقدمة **(Airport Information System, 2024)**،غياب الحوافز الحكومية أو التنظيمية: غياب الحوافز كالإعفاءات الضريبية والدعم المالي أو لوائح شديدة تدفع المطارات إلى تبني ممارسات نحو الاستدامة ، محدودية التكنولوجيا المتاحة في بعض المجالات: بالرغم من توافر التكنولوجيا المتقدمة والتقنيات الخضراء، إلا أنه مازال هناك تحديات تواجه تطوير الحلول المستدامة في بعض عمليات المطار، كاستخدام وقود الطائرات المستدام (SAF)الذي لا يزال قيد التطوير والإنتاج بكميات محدودة، مقاومة التغيير من الموظفين أو الشركاء: قد يواجه المطار بعض التحديات مثل مقاومة الموظفين ضد التغيير ورفضهم لاستخدام أساليب جديدة وخاصة الذين اعتادوا على العمل بطرق معينة، وقد تكون المقاومة من قبل الشركات الشريكة كشركات الطيران وشركات المناولة الأرضية وخاصة التي ليس لديها القدرة على تحمل أي تكاليف إضافية أو تغيير عملياتها، بالإضافة إلى نقص الخبرات والكفاءات المتخصصة حيث لا تتوافر الخبرات والكفاءات التي يتطلبها جهود خفض البصمة الكربونية وتحقيق الاستدامة في مختلف العمليات كإدارة الطاقة والنقل وتخطيط النقل المستدام**(Gössling & Xiang, 2025)**.

وبالرغم من كل هذه التحديات التي قد تعوق الذكاء الاصطناعي من المساهمة في خفض البصمة الكربونية، إلا أن المزايا المحتملة لتقليل التكاليف التشغيلية، ورفع مستوى الكفاءة، والسعي نحو تحقيق الاستدامة البيئية تدفع الجهات المختصة نحو الاستثمار في هذه التقنيات لصالح مستقبل مطار القاهرة الدولي والمقاصد السياحية في مصر بوجه عام.

فروض الدراسة:

الفرض الأول: هناك تأثير معنوي ذو دلالة إحصائية بين البصمة الكربونية والاستدامة البيئية بمطار القاهرة الدولي.

الفرض الثاني: هناك تأثير معنوي ذو دلالة إحصائية بين البصمة الكربونية وتبني استخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي.

الفرض الثالث: هناك تأثير معنوي ذو دلالة إحصائية بين تبنى استخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي وتحقيق الاستدامة البيئية بمطار القاهرة الدولي.

الفرض الرابع: تتوسط تقنيات الذكاء الاصطناعي العلاقة بين التقليل من آثار البصمة الكربونية وتحقيق الاستدامة البيئية في مطار القاهرة الدولي.

منهجية البحث

استخدمت هذه الدراسة نهج المسح القائم على الاستبيانات الذي تكون من جزأين؛ تم جمع البيانات الديموغرافية في الجزء الأول، بينما تضمن الجزء الثاني والذي يتكون من أربعة محاور، المحور الأول: المتغير المستقل (البصمة الكربونية)

ويشتمل على (8) عبارات ؛ المحور الثاني: المتغير الوسيط وهو تقنيات الذكاء الاصطناعي ويشتمل على(9) عبارات؛ المحور الثالث: المتغير التابع هو الاستدامة البيئية في مطار القاهرة الدولي ويتضمن (12) عبارة والمحور الرابع يتضمن أثر تقنيات الذكاء الاصطناعي على العلاقة بين البصمة الكربونية والاستدامة البيئية ويشتمل على (5) عبارات وقد تم الاعتماد على بعض الدراسات كمقاييس لمتغيرات البحث كما في الجدول رقم(1)

جدول رقم (1) مقاييس متغيرات البحث وعدد الفقرات بالاستقصاء

المتغير	عدد العبارات	المقياس الذي تم الاعتماد عليه
البصمة الكربونية	8	(Tunley Environmental ,2024 ; Nishan et al., 2025; Wang et al.,2024)
تقنيات الذكاء الاصطناعي	9	(Nangyala et al. ,2024; Pumpuri & Zanin ,2021; Diogo ,2024)
الاستدامة البيئية	12	(Su et al.,2018; Airports Council International ,2024; Sreenath et al.,2021; Tarsem & Huzaifa ,2024)
الذكاء الاصطناعي والاستدامة البيئية	5	(Ngo & Kim ,2021; Gilang et al. ,2023; Al- Taee & Al- Turjman ,2020)

المصدر: من إعداد الباحثين اعتماداً على الدراسات السابقة

يتمثل الهدف الرئيسي للبحث في التعرف على دراسة أثر تقنيات الذكاء الاصطناعي على العلاقة بين البصمة الكربونية والاستدامة البيئية في مطار القاهرة الدولي تم إنشاء الاستبيان باستخدام نماذج Google وتم توزيعه من خلال LinkedIn وهو أحد أكثر وسائل التواصل الاجتماعي استخدامًا للأغراض المهنية والبحثية كجمع البيانات من خلال الاستبيانات حيث يضم LinkedIn العديد من موظفي شركة ميناء القاهرة الدولي (مطار القاهرة)، كما تم إرسال رابط الاستبيان عبر تطبيقات WhatsApp و Facebook وتمثلت عينة الدراسة على توزيع استمارات استقصاء على عينة عشوائية من المديرين ورؤساء الأقسام والقطاعات بشركة ميناء القاهرة الدولي خلال الفترة من شهر يناير حتى شهر مارس 2025 ، وتم توزيع عدد 400 استمارة وتم جمع 381 استمارة وقد كان هناك 354 استمارة صالحة للتحليل الإحصائي بنسبة استجابة 88.5% حيث تم استبعاد 27 استمارة غير صالحة للتحليل، وتم قياس جميع الفقرات بمقياس ليكرت الخماسي الذي يتراوح من 1 = "اختلف بشدة" إلى 5 = أوافق بشدة.

تحليل النماذج الهيكلية:

تُعد نمذجة المعادلات الهيكلية بالمربعات الصغرى الجزئية (PLS-SEM) أسلوبًا إحصائيًا قويًا ومتعدد الاستخدامات، وقد تم استخدام برنامج WarpPLS 7.0 لتطبيقه بهدف التحقق من صحة الفرضيات النظرية المقترحة في الدراسة. يجمع هذا الأسلوب بين مميزات تحليل المربعات الصغرى الجزئية (PLS) ونمذجة المعادلات الهيكلية(SEM) مما يجعله مناسبًا بشكل خاص لتحليل العلاقات المعقدة بين المتغيرات، ويحظى أسلوب PLS-SEM بقبول واسع وشيوع كبير في العديد من المجالات البحثية، بما في ذلك الأدبيات السياحية **(Hair et al. , 2022)** حيث يُنظر إليه كأداة إحصائية فعالة لتحليل النماذج الهيكلية المعقدة التي تتضمن علاقات مباشرة وغير مباشرة بين متغيرات متعددة العناصر، وذلك لقدرته على التعامل مع البيانات غير الطبيعية والعديد من المتغيرات الكامنة**(Sarstedt et al., 2017)**.

جدول رقم (2) الخصائص الديمغرافية

الخصائص	الفئة	التكرارات	النسبة	الخصائص	الفئة	التكرارات	النسبة
النوع	ذكر	200	56.50	سنوات الخبرة في قطاع الطيران / المطارات	أقل من 5 سنوات	69	19.49
	أنثى	154	43.50		من 5 سنوات الى أقل من 10 سنوات	170	48.02
					من 10 سنوات فأكثر	115	32.49
الفئة العمرية (السنوات)	من 30 إلى أقل من 40	75	21.19	المستوي الوظيفي	إدارة عليا	100	28.25
	40 إلى أقل من 50	166	46.89		إدارة وسطى	156	44.07
	50 إلى أقل من 60	113	31.92		موظف تنفيذي / فنى	98	27.68

تشير الجدول رقم (2) إلى أن 56.50% من المستجيبين كانوا من الذكور و43.50% من الاناث. وكان 46.89% من المستجيبين تتراوح أعمارهم بين 40 وأقل من 50 عامًا. بينما كان31.92 % تتراوح أعمارهم من سن 50 إلى أقل من 60، ومن 30عام إلى أقل من 40 تتراوح نسبتهم 21.19%، بالإضافة إلى أن بلغ عدد المستجيبين التي تبلغ سنوات خبرتهم من 5 سنوات إلى أقل من 10 سنوات 32.49 %، بينما بلغ نسبة سنوات خبرتهم من 10 سنوات فأكثر 28.25%، أما من كانت سنوات خبرتهم أقل من 5 سنوات فكانت نسبتهم 19.49 %، أما بالنسبة للمسمى الوظيفي فبلغت نسبة موظفي الإدارة الوسطي 44.07%، بينما بلغت نسبة كلاً من موظفي الإدارة العليا والموظفين التنفيذيين على التوالي 28.25 % و27.68%.

جدول رقم (3) نتائج الصدق التقاربي

المتغيرات	كود الفقرة	الفقرة	تشبُع الفقرة	الموثوقية المركبة	كرونباخ ألفا	متوسط التباين المُست خرج
البصمة الكربونية	بصمة 1	يعتبر استهلاك الطاقة من كهرباء، ووقود في المطار المنبع الأساسي للبصمة الكربونية.	0.818	0.884	0.871	0.717
	بصمة 2	تساهم حركة الطائرات في زيادة الانبعاثات الكربونية.	0.836			
	بصمة 3	تؤثر عمليات الصيانة والتشغيل للمعدات والمركبات الأرضية في المطار في زيادة الانبعاثات الكربونية.	0.871			
	بصمة 4	تساهم إدارة النفايات سواء كانت الصلبة أو السائلة في المطار في مستوى البصمة الكربونية الإجمالية.	0.823			
	بصمة 5	يؤدي استهلاك المياه وعمليات معالجة مياه الصرف الصحي في المطار إلى انبعاثات كربونية بطريقة غير مباشرة.	0.895			
	بصمة 6	تؤثر سلسلة التوريد للمطار كنقل البضائع وغيرها من الخدمات اللوجستية في البصمة الكربونية.	0.867			
	بصمة 7	يؤثر استخدام الوقود الأحفوري لتوليد الطاقة في المطار إلي زيادة الانبعاثات الكربونية.	0.856			

	بصمة 8	يلعب إنشاء البنية التحتية للمطارات دوراً محوريا في تحديد مستوى البصمة الكربونية.	0.882			
تقنيات الذكاء الاصطناعي في المطارات	تقنيات 1	تساهم أنظمة إدارة الحركة الجوية القائمة علي تقنيات الذكاء الاصطناعي في تقليل استهلاك الوقود والانبعاثات الكربونية.	0.877	0.905	0.881	0.761
	تقنيات 2	يسهم الذكاء الاصطناعي في إدارة أنظمة الاضاءة والتبريد ورفع كفاءة الطاقة.	0.862			
	تقنيات 3	استخدام أدوات التحليل التنبؤي القائم علي الذكاء الاصطناعي في صيانة المعدات بشكل يحد يقلل من الأعطال وتخفيض استهلاك الطاقة.	0.828			
	تقنيات 4	يدعم الذكاء الاصطناعي عمليات إدارة النفايات وإعادة التدوير في المطار.	0.872			
	تقنيات 5	يسهم استخدام الروبوتات والأنظمة الذكية في تقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري.	0.829			
	تقنيات 6	يساعد الذكاء الاصطناعي على تحسين تخطيط مسارات الطائرات مما يقلل وقت الانتظار والانبعاثات.	0.876			
	تقنيات 7	تعزز النظم الذكية من عملية تحسين جودة الهواء داخل وخارج المطار.	0.893			
	تقنيات 8	يمكن للذكاء الاصطناعي أن يتنبأ بالانبعاثات ويقترح حلول لتحسين الكفاءة التشغيلية	0.888			
	تقنيات 9	يقوم الذكاء الاصطناعي بمراقبة وتحليل انبعاثات الكربون بدقة.	0.901			
مدى تطبيق المطار لممارسات الاستدامة البيئية	استدامة 1	يسعي المطار إلى الحد من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري بشكل فعال.	0.836	0.930	0.914	0.812
	استدامة2	يطبق المطار استراتيجيات لاستخدام الطاقة بشكل فعال.	0.900			
	استدامة3	يعتمد المطار على استخدام مصادر الطاقة المتجددة بهدف تقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري.	0.885			
	استدامة4	يطبق المطار برامج ذو فاعلية لإدارة ومعالجة المخلفات.	0.871			
	استدامة5	يعمل المطار على حماية الموارد المائية وترشيد استهلاكها.	0.854			
	استدامة6	يتبنى المطار اجراءات من شانها أن تقلل من التلوث الضوضائي الناتج عن العمليات التشغيلية.	0.855			
	استدامة7	يهتم المطار بصون وحماية التنوع البيولوجي والنظام البيئي المحيط.	0.882			
	استدامة8	يلتزم المطار بعملية التقييم البيئي ومراقبة الأداء بشكل دوري.	0.870			
	استدامة9	يطبق المطار المعايير البيئية المعتمدة واللوائح التنظيمية المحلية والدولية	0.916			
	استدامة10	تقليل أثر البصمة الكربونية في المطار يؤثر على سمعته محليا ودليا ومن ثم تعزيز سمعة مصر كوجهة سياحية خضراء	0.808			
	استدامة11	يمثل مطار القاهرة الدولي مصر كوجهة سياحية ملتزمة بمعايير الاستدامة البيئية	0.855			
	استدامة12	يتلقى العاملون في المطار التدريب بشكل دوري ومنتظم لرفع وعيهم بأهمية الممارسات البيئية المستدامة	0.816			
أثر تقنيات الذكاء الاصطناعي في التقليل من آثار البصمة الكربونية وتعزيز الاستدامة البيئية في المطار	الأثر 1	استخدام الذكاء الاصطناعي يرفع من قدرة المطار على تقليل البصمة الكربونية مما يساهم في تحقيق الاستدامة البيئية	0.810	0.916	0.904	0.716
	الأثر 2	تساهم تطبيقات الذكاء الاصطناعي في تحسين كفاءة استخدام الطاقة مما يقلل من الانبعاثات وتحسين الأداء البيئي بشكل عام.	0.845			
	الأثر3	يعزز الذكاء الاصطناعي من جهود المطار سعيا نحو تحقيق الاستدامة البيئية.	0.832			
	الأثر 4	يقدم الذكاء الاصطناعي بيانات دقيقة تساعد في اتخاذ القرارات بشأن خفض الانبعاثات.	0.915			
	الأثر 5	تطبيق تقنيات لذكاء الاصطناعي يساهم في تحول المطارات نحو مطارات أكثر استدامة بيئياً.	0.878			

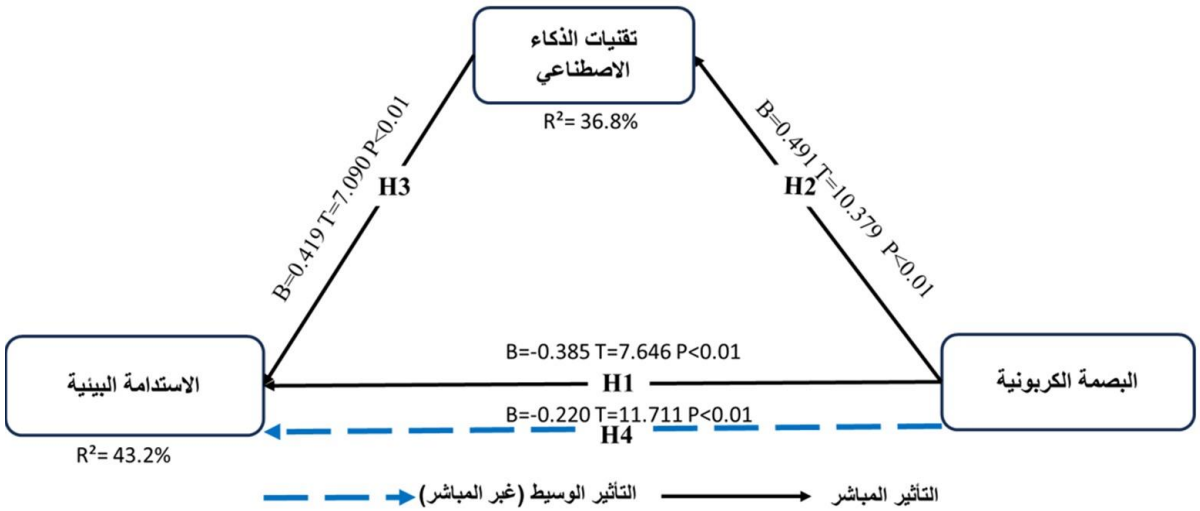
يتضح من الجدول رقم (3) أنه تم التحقق من صحة وموثوقية جميع المتغيرات الكامنة لضمان فعالية نموذج القياس. تم قبول جميع تشبعات الفقرات التي تجاوزت 0.7، (Hair et al., 2022)، وبالنسبة لتقييم الموثوقية: ظهرت قيم ألفا كرونباخ والموثوقية المركبة ومتوسط التباين المستخرج لنموذج القياس والتي قد تجاوزت قيم ألفا كرونباخ والموثوقية المركبة الحد الأدنى المقترح 0.70، مما يشير إلى موثوقية اتساق داخلي قوية (Hayes et al., 2017)، أما تقييم الصدق فقد تم تأكيد الصدق التقاربى للمقاييس باستخدام قيم متوسط التباين المستخرج التي تجاوزت 0.50، (Hair et al.,2022). بالإضافة إلى ذلك، تم تقييم الصدق التمييزي باستخدام نسبة HTMT. نظرًا لأن قيم HTMT كانت أقل من 0.90 لجميع المقاييس الكامنة، فهذا يدل على وجود صدق تمييزي قوي لنموذج القياس (Sarstedt et al., 2017).

جدول (4) نتائج الصدق التمييزي

	البصمة الكربونية	تقنيات الذكاء الاصطناعي والاستدامة البيئية	الاستدامة البيئية
البصمة الكربونية	0.410		
تقنيات الذكاء الاصطناعي والاستدامة البيئية	0.567	(0.354)	
الاستدامة البيئية	0.486	0.527	(0.605)

جدول (5) نتائج اختبار الفروض المباشرة وغير المباشرة

	المسار	قيمةβ	قيمة T	المعنوية	حجم التأثير	النتيجة
H1	**البصمة الكربونية ← الاستدامة البيئية**	−0.385	7.646	P<0.01	0.183	قبول
H2	**البصمة الكربونية ← تقنيات الذكاء الاصطناعي**	0.491	10.379	P<0.01	0.248	قبول
H3	**تقنيات الذكاء الاصطناعي ← الاستدامة البيئية**	0.419	7.090	P<0.01	0.180	قبول
H4	**البصمة الكربونية ← تقنيات الذكاء الاصطناعي ← الاستدامة البيئية**	−0.220	11.711	P<0.01	0.214	قبول



شكل رقم (1) نتائج الفروض المباشرة وغير المباشرة

- تم فحص النموذج الهيكلي باستخدام معامل المسار، القيمة الاحتمالية، أحجام التأثير ومعامل التحديد (انظر شكل 1 وجدول رقم (5). كان للبصمة الكربونية تأثيراً سلبياً معنويًا في الاستدامة البيئية بمطار القاهرة الدولي (قيمة بيتا = 0.385-، قيمة ت = 7.646، القيمة الاحتمالية < 0.001، حجم التأثير = 0.183) بما يؤكد قبول الفرض الأول (هناك تأثير معنوي ذو دلالة إحصائية بين البصمة الكربونية والاستدامة البيئية بمطار القاهرة الدولي. وهذا يتفق مع الدراسات الآتية مثل:

(مركز المعلومات ودعم اتخاذ القرار، 2025; Tunley Environmental 2024; Nishan et al.,2025 ;Wang et al., 2024) حيث يتضح أن العلاقة بين البصمة الكربونية والاستدامة البيئية علاقة مباشرة وعكسية، فالعمل على تقليل البصمة الكربونية هو مؤشر رئيسي لتحقيق الاستدامة، فكلما زاد معدل البصمة الكربونية، زاد التأثير السلبي على البيئة وقلت فرص تحقيق الاستدامة البصمة والعكس صحيح

- كما أثبتت نتائج جدول رقم (5) وشكل 1 أن البصمة الكربونية أثرت تأثيراً ايجابياً ومعنويًا وساعدت في تبني الإدارة بمطار القاهرة الدولي استخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي من أجل استخدامها في التقليل من البصمة الكربونية (قيمة بيتا = 0.491، قيمة ت = 10.379، القيمة الاحتمالية < 0.001، حجم التأثير = 0.248)، بما يثبت قبول الفرض الثاني والذي ينص على أن (هناك تأثير معنوي ذو دلالة إحصائية بين والبصمة الكربونية وتبني استخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي). وتتوافق النتيجة الثانية مع الدراسات السابقة مثل:

(Nangyala et al., 2024; Pumpuri & Zanin ,2021; Diogo,2024) فقد تبين أن الذكاء الاصطناعي يعتبر أداة قوية من شانها أن تعمل على خفض البصمة الكربونية بمطار القاهرة الدولي وتحسين كفاءة العمليات التشغيلية وتقليل استهلاك الوقود والطاقة ، مما يعني أن دمج الذكاء الاصطناعي يعزز جهود تقليل معدل البصمة الكربونية بشكل كبير.

- كما أكدت القيم (قيمة بيتا = 0.419، قيمة ت = 7.090، القيمة الاحتمالية < 0.001، حجم التأثير = 0.180) على وجود تأثير معنوي ذو دلالة إحصائية بين تبني استخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي وتحسين مؤشرات الاستدامة البيئية في مطار القاهرة الدولي وهو ما يدعم قبول الفرض H3 والذي ينص على أن (هناك تأثير معنوي ذو دلالة إحصائية بين تقنيات الذكاء الاصطناعي وتحقيق الاستدامة البيئية بمطار القاهرة الدولي). وهذا ما يؤكد تحقيق الفرض الثالث ويتوافق ذلك مع الدراسات السابقة مثل:

(Su et al., 2018; Airports Council International, 2024; Tarsem &Huzaifa, 2024, Sreenathet al., 2021)

وقد تبين أن الذكاء الاصطناعي يعد أداة قوية لتحقيق الاستدامة البيئية في المطارات من خلال قدرته علي تحليل كمية كبيرة جداً من البيانات والمعلومات والتوجيه نحو اتخاذ القرارات الصائبة فهو يمثل حافز نحو التحول للمطارات المستدامة التي تتميز بالكفاءة التشغيلية والاقتصادية.

-يوضح الشكل رقم (1) الدور الوسيط لمتغير تقنيات الذكاء الاصطناعي بين البصمة الكربونية والاستدامة البيئية في مطار القاهرة الدولي حيث تشير القيم تفسير أن (قيمة بيتا = 0.220-، قيمة ت = 11.711، القيمة الاحتمالية < 0.001، حجم التأثير = 0.214)، وهو ما يدعم قبول الفرض H4 وتحقيقه (تتوسط تقنيات الذكاء الاصطناعي العلاقة بين التقليل من آثار البصمة الكربونية وتحقيق الاستدامة البيئية في مطار القاهرة الدولي) وتتوافق تلك النتيجة الرابعة مع الدراسات السابقة مثل: **(Al-Turjman & Al-Taee, 2020; Gilang et al., 2023 ; Ngo & Kim, 2021)**

فقد اتضح أن الذكاء الاصطناعي يمثل وسيط يربط بين خفض البصمة الكربونية بمطار القاهرة الدولي وتحقيق الاستدامة البيئية من خلال أنه نظام متكامل يمكن أن يحدد بدقة المصادر الأكثر مساهمة في البصمة الكربونية للمطار والتي تعد نقطة هامة للحد من الانبعاثات والسعي نحو تحقيق الاستدامة.

يوضح الشكل رقم (1) أن متغير تقنية الذكاء الاصطناعي قد فسر ما نسبته 43.8% من التباين في متغير الاستدامة البيئية وهذا يدل على أن النموذج الهيكلي يتمتع بقدرة تفسيرية جيدة ويؤكد أهمية التقنيات الذكاء الاصطناعي في التقليل من آثار البصمة الكربونية وتحقيق الاستدامة البيئية في مطار القاهرة الدولي.

النتائج:

يُعد قطاع الطيران من القطاعات التي تساهم بشكل كبير في انبعاثات الغازات الدفيئة، ومع تزايد حركة الطيران العالمية، أصبح من الضروري فهم وقياس البصمة الكربونية للمطارات. وتُسعى المطارات حول العالم إلى تبني ممارسات مستدامة لتقليل تأثيرها البيئي، ومن خلال تبني تلك الممارسات واستخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي، يمكن للمطارات أن تُسهم في تحقيق استدامة بيئية حقيقية وجذب المزيد من شركات الطيران والمسافرين المهتمين بالبيئة حيث أن ذلك يمكن أن يعزز من سمعتها ومكانتها التنافسية على الصعيدين المحلي والدولي. بالإضافة الى أن استخدام هذه التقنيات يحسن كفاءة العمليات، مثل إدارة الحركة الجوية، وتحسين مسارات الطائرات، وإدارة الطاقة في المباني، مما يؤدي إلى تقليل البصمة الكربونية، كما أن خفض البصمة الكربونية في المطارات لا يقتصر فقط على الفوائد البيئية، بل يمتد ليشمل فوائد اقتصادية (مثل توفير الطاقة، تقليل التكاليف التشغيلية) واجتماعية (تحسين جودة الهواء، صحة أفضل للمجتمعات المحيطة).

توصيات الدراسة:

نظرا للأهمية القصوى لتحقيق الاستدامة البيئية في قطاع الطيران، وتعزيز دور مطار القاهرة الدولي فقد أصبح إدارة البصمة الكربونية أمرًا هاماً من خلال الدور الوسيط الذي تلعبه تقنيات الذكاء الاصطناعي في تحقيق هذه الأهداف لذلك يجب تعزيز البحث والتطوير في التقنيات الخضراء لقطاع الطيران لتحقيق استدامة بيئية في قطاع الطيران مثل وقود الطيران المستدام(SAF) ، وأنظمة الدفع التي تعتمد على الهيدروجين أو الكهرباء، وحلول الطاقة المتجددة المتقدمة للمطارات ،العمل على استخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي لتقليل آثار البصمة الكربونية في المطارات وتحسين كفاءة المطارات مثل إنشاء نظام لمراقبة وقياس الانبعاثات الكربونية من خلال الذكاء الاصطناعي واتخاذ التدابير اللازمة للحد منها، استخدام الطاقة الشمسية الحالية ومصادر الطاقة المتجددة الأخرى لتغطي احتياجات المطار من الكهرباء المطلوبة ،العمل بأنظمة إدارة

المباني الذكية حتى يمكن التحكم آليا في الإضاءة، التدفئة، والتبريد بالإضافة الى استخدام الذكاء الاصطناعي في فرز النفايات بشكل آلي، وتتبع مصادرها، وكيفية إعادة تدويرها مما يساهم في تقليل كميات انتاج النفايات من المصدر، مع ضرورة التفعيل الشامل لأنظمة الإدارة البيئية الأيزو 14001 مع فهم جميع الشركات داخل المطار لتلك المعايير والعمل بها والعمل على تقديم دورات تدريبية لرفع كفاءة الموارد البشرية داخل المطار للتدريب على كيفية استخدام الأنظمة الحديثة،بالإضافة إلى تطبيق السياسات واللوائح المحلية والدولية والتي تدعم الممارسات المستدامة، مثل خطة تعويض الكربون وخفضه في مجال الطيران الدولي ويجب أن تشمل هذه السياسات حوافز للمطارات وشركات الطيران التي تتبنى التقنيات والممارسات الخضراء، بالإضافة إلى فرض معايير بيئية صارمة وتعزيز التعاون بين الحكومات، شركات الطيران، المطارات، مزودي التكنولوجيا، والمؤسسات الأكاديمية، بالإضافة إلى زيادة الوعي والمشاركة المجتمعية وتكثيف وحملات التوعية الموجهة للمسافرين والمجتمعات المحلية حول أهمية الاستدامة ودورهم في تحقيقها مع تشجيع السلوكيات المستدامة، مثل تقليل النفايات الشخصية واختيار خيارات السفر الصديقة للبيئة وذلك لتحقيق الاستدامة البيئية .

المراجع:

المراجع العربية:

- كحله، نادر جلال عزت، حمودة، عمرو على محمود (2024)، إطار مقترح لحساب البصمة الكربونية لدعم تقارير المالية في تحقيق التنمية المستدامة: أدلة من قطاع الاعمال المصري، المجلة العلمية للتجارة والتمويل، المجلد 44، عدد خاص، ص ص278-318
- المنشاوي، أحمد نبيه عبد الفتاح (2024). البصمة الكربونية وتأثيرها على التنمية المستدامة حالة الدراسة المنطقة الصناعية بمدينة العاشر من رمضان. مجلة العلوم البيئية، كلية الدراسات العليا والبحوث البيئية، جامعة عين شمس، المجلد 7، العدد 53، ص ص 1901-1919.
- عبد العزيز، أماني محمد (2023)، الاستدامة البيئية وتأثير التغيرات المناخية على إدارة المؤسسات الأرشيفية دراسة استكشافية، المجلة العلمية للمكتبات والوثائق والمعلومات، مجلد 6، العدد 20، ص ص 6-47.
- فرحات، تحية طلال نصر، العزازي، طارق محمد سباعي (2024)، دور الاقتصاد الأخضر نحو خلق دراسة مجتمعات مستدامة بالتطبيق على المطارات المصرية، مجلة اتحاد الجامعات العربية للسياحة والضيافة، المجلد 26، العدد 1، ص ص 156-184.
- محمد، محمد حمدى زكي (2023)، الجامعة ذات التوجه نحو الاستدامة البيئية: دراسة مقارنة لجامعات واترلو الكندية وجرفيث الأسترالية وأسوان المصرية، المجلة التربوية لكلية التربية بسوهاج، المجلد2، العدد106، ص ص 1076-1402
- مركز المعلومات ودعم اتخاذ القرار(2025)، وقود الطيران المستدام فرصة لخفض الانبعاثات الكربونية المرتبطة بقطاع الطيران ، مجلس الوزراء . https://mediadr.sis.gov.eg,Accessed on 01/03/2025
- وزارة الطيران المدني المصري (2025)، مشروع وقود الطائرات المستدام، وزراة الطيران المدني المصري. 01/03/2025 https://www.civilaviation.gov.eg,Accessed on
- يدك، محمد طلعت (2019)، أثر السياحة البيئية في تحقيق التنمية المستدامة في مصر، مجلة الدراسات القانونية المقارنة، المجلد5، العدد1، ص ص72-90

-عبد القادر، آية عدلي، محمد علي، شريف، أحمد نور الدين، جهاد (2021)، السياحة البيئية ودورها في تحقيق التنمية المستدامة، المجلة العلمية للدراسات والبحوث المالية والإدارية، كلية التجارة، جامعة المنوفية السادات، المجلد9، العدد 1 ص ص 197-227.

المراجع الأجنبية:

Chandel, Monikaand Arora, Manpreet (2025), Achieving the Sustainable Development Goals through Financial Inclusion: A Bibliometric and Content Analysis, Tourism & Management Studies, Vol.(21) No(1), pp21-37.

Al-Taee, M and Al-Turjman, F, (2020). Smart energy management systems for smart airports based on IoT and AI. Future Generation Computer Systems, Vol (108), pp1238-1249.

Daniel, B, L, Jaffar, A, Chang, H, Ladislav, P and Syed, A, S (2023), Tourism, urbanization and natural resources rents matter for environmental sustainability: The leading role of AI and ICT on sustainable development goals in the digital era, vol (82)(C).

O- ECD Tourism (2024), Artificial Intelligence and Tourism, OECD Tourism, Paris

Tarsem, Fatima and Huzaifa, Arsalan (2024), AI-Driven Innovations for Sustainable Tourism Development and Customer Engagement, pp1-20.

Diogo, F, Maria, E and Luis, S (2024), Developing a Comprehensive Framework for Assessing Airports,Environmental Sustainability Vol(16) No(15), pp 1-19.

G- ilang, M, Iis, T, Yoo, R and Anjan, P (2023), Intelligent automation for sustainable tourism: a systematic review,Journal of Sustainable Tourism, Vol. (3), pp1-20

Gössling, S and Xiang, Y, M (2025), AI and sustainable tourism: an assessment of risks and opportunities for the SDGs, pp1-14.

Graham, A(2014) , Managing airports: An international perspective, second edition

Hair, J. F., Hult, G. T. M., Ringle, C. M., & Sarstedt, M. (2022). A Primer on Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM) (3rd Ed.).

Hayes, A.F. (2017) Introduction to Mediation, Moderation, and Conditional Process Analysis: A Regression-Based Approach. Guilford Press, New York.

Nangyalay, K, Waleed, K, Muhammad, H and Arab, N (2024), the Role of Artificial Intelligence in Regenerative Tourism and Green Destinations, Emerald Publishing, United Kingdom.

Ngo, P. and Kim, J. (2021). Artificial intelligence-based waste classification system using image processing and deep learning. Journal of Environmental Management, Vol (296), pp 350-361.

Sreenath, S, Sudhakar, k and Yusop, AF (2021), Sustainability at airports: Technologies and best practices from ASEAN countries, Journal of Environmental Management, Vol (99), 113639

Nishan, A, Hailin, Li and Bhaskaran, G (2025), A Bibliometric and Systematic Review of Carbon Footprint Tracking in Cross-Sector Industries: Emerging Tools and Technologies, Vol (17), No.6, pp1-30.

Pampuri, N., and Zanin, A. (2021). Artificial intelligence for airport surface operations: A review and a proposed architecture. Journal of Air Transport Management, Vol (93), 102073.

Raafat, M., Hammoud, G, and Fathallah, M. (2023). Impact of artificial intelligence on enhancing the passenger experience at international airports and smart airports. Journal of Hospitality & Tourism Management, Vol (3), Issue2, pp136-148.

Sarstedt, M., Ringle, C. M., and Hair, J. F. (2017). Partial Least Squares Structural Equation Modeling,Handbook of Market Research pp 1-40.

Wang, X, Dong X, Zhang Z and Wang, W (2024). "Transportation carbon reduction technologies: A review of fundamentals, application, and performance journal of Traffic and Transportation Engineering, Vol (11) No (6), pp 1340-1377.

Su,L, P, Ju, C,Alastair , M. Morrison,W,Shiung, H and Meng,C, L (2018), Will the Future Be Greener? The Environmental Behavioral Intentions of University Tourism Students, Vol (10) No (3), pp1-17.

Tunley-environmental (2024), how to Map an Airport's Carbon Footprint, https://www.tunley-environmental.com/en/insights/mapping-an-airports-carbon-footprint, Accessed on 11/02/2025.

Zhu, S., Tang, Z., and Chen, G. (2021). A review of deep learning methods for predictive maintenance in the aviation industry. Expert Systems with Applications, 172, 114620

https://www.carbonbrief.org, Accessed on 11/01/2025

Air Transport Association (2025), How the Industry Approaches Sustainability, Air Transport Association, https://www.iata.org/en/programs/sustainability,Accessed on 22/01/2025.

Airports Council International (2024), he Role of Airports in Reducing Aviation's Carbon Emissions, https://blog.aci.aero/environment-and-sustainability/the-role-of-airports-in-reducing-aviations-carbon-emissions, Accessed on 22/01/2025

Airport Information System, (2024), Airport Sustainability in 2024 – Challenges, Best Practices & Trends, https://blog.airport-information-systems.com/airport-sustainability. Accessed on 30/01/2025

The Impact of Carbon Footprint on Environmental Sustainability at Cairo International Airport: The Mediating Role of Artificial Intelligence Technologies

Rasha Ahmed Mohamed Khalil[1] **Reham Abdelrahaman Gad Abdu**[2]

[1,2]Faculty of Tourism & Hotels, Suez Canal University, Egypt

Abstract

This current research highlights the impact of the carbon footprint on achieving environmental sustainability at Cairo International Airport, and explores the role of Artificial Intelligence (AI) technologies in enhancing this relationship. Through the distribution of 400 electronic questionnaires to airport employees, 354 valid forms were obtained for statistical analysis, the results of structural equation modeling showed that the carbon footprint has a significant effect on environmental sustainability, and that AI technologies play a mediating role in reducing the effects of the carbon footprint. The research recommends the necessity of using AI technologies to improve airport efficiency and reduce carbon emissions, while fostering cooperation among stakeholders and increasing community awareness about the importance of sustainability. This can be achieved by establishing a system for monitoring carbon emissions, utilizing renewable energy sources, and encouraging sustainable behaviors among travelers and local communities**.**

Keywords: Carbon Footprint, Environmental Sustainability, Artificial Intelligence, Airport Sustainability, Cairo International Airport.