ISSN: 1994-4217 (Print) 2518-5586(online)

Journal of College of Education

Available online at: https://eduj.uowasit.edu.iq

Dr. Abdul Rahman Abdul Kareem Yahya

Tikrit University / College of Education for Girls

Email: abdulrahman.yahya@tu.edu.iq

Keywords:

Greenhouse Gases, Geographic Information Systems, Artificial Intelligence

A r t i c l e i n f o

Article history:

Received 13.Mar.2025

Accepted 6.Apr.2025

Published 10.May.2025

Employing Artificial Intelligence and Geographic Information Systems to Monitor Greenhouse Gases in Iraq Using the TROPOMI-5P Sensor for 2024.

A B S T R A C T

Artificial intelligence (AI) and Geographic Information Systems (GIS) contribute to the precise and efficient monitoring of greenhouse gases by analyzing environmental data and tracking emission sources. AI relies on advanced algorithms to analyze gas levels under different weather conditions, helping to predict climate changes accurately. GIS contributes by creating interactive maps that reflect the spatial distribution of greenhouse gas emissions, assisting in understanding the impact of industrial activities on the environment. This integration enhances the development of sustainable strategies to reduce emissions and mitigate the effects of climate change through accurate scientific analysis. This study aims to monitor greenhouse gases in Iraq during the winter and summer seasons of 2024 using Sentinel-5P satellite algorithms, with the gases monitored being carbon dioxide (CO), nitrogen oxide (NO2), sulfur dioxide (SO2), and methane (CH4).

The study concluded that the integration of AI and GIS technologies contributes to accurately monitoring greenhouse gases by rapidly processing and analyzing environmental data and representing it geographically. The results also indicate that the concentration of NO_2 and CO increases in winter due to the greenhouse effect and heating emissions, while it rises in summer due to photochemical reactions and increased human activities. As for SO_2, its concentration decreases in winter due to fewer industrial activities and the effect of rainfall, while it increases in summer due to drought and higher temperatures. The variation in methane (CH4) concentrations between winter and summer is attributed to climate impacts, with pollution being lower in winter and increasing in summer due to industrial activities and transportation.

© 2022 EDUJ, College of Education for Human Science, Wasit University

DOI: https://doi.org/10.31185/eduj.Vol59.Iss1.4317

توظيف الذكاء الاصطناعي ونظم المعلومات الجغرافية لمراقبة غازات الاحتباس الحراري في العراق باستخدام مستشعر TROPOMI-5P لعام ٢٠٢٤

م.د. عبد الرحمن عبد الكريم يحيى
جامعة تكريت / كلية التربية للبنات

الملخص:

يساهم الذكاء الاصطناعي ونظم المعلومات الجغرافية في رصد ومراقبة الغازات الدفيئة بدقة وكفاءة عالية من خلال تحليل البيانات البيئية وتتبع مصادر الانبعاثات. إذ يعتمد الذكاء الاصطناعي على خوارزميات متقدمة لتحليل مستويات الغازات في ظل الظروف الجوية المختلفة مما يسهم في التنبؤ بالتغيرات المناخية بدقة. كما تساهم نظم المعلومات الجغرافية بنشاء خرائط تفاعلية تعكس التوزيع المكاني لانبعاثات الغازات الدفيئة، مما يساعد في فهم تأثير الأنشطة الصناعية على البيئة. يعزز هذا التكامل تطوير استراتيجيات مستدامة للحد من الانبعاثات والتخفيف من آثار التغير المناخي عبر تحليلات علمية دقيقة. وتهدف هذه الدراسة إلى رصد غازات الاحتباس الحراري في العراق خلال عام ٢٠٢٤ في موسمي الشتاء والصيف، باستخدام خوارزميات القمر الاصطناعي Sentinel-5P، حيث تشمل الغازات المرصودة: ثاني أكسيد الكربون (CO)، وأكسيد النيتروجين (NO_2)، وثاني أكسيد الكبريت (SO_2)، بالإضافة إلى الميثان (CH4).

استنتجت الدراسة أن التكامل بين تقنيات الذكاء الاصطناعي ونظم المعلومات الجغرافية يسهم في رصد غازات الاحتباس الحراري بدقة، من خلال معالجة وتحليل البيانات البيئية بسرعة وتمثيلها جغرافياً. وتشير النتائج ايضاً أن تركيز غازي NO_2 وCO يرتفع في الشتاء بسبب الانعكاس الحراري وانبعاثات التدفئة، بينما يزداد في الصيف نتيجة للتفاعلات الكيميائية الضوئية وزيادة الأنشطة البشرية. أما SO_2 فينخفض تركيزه في الشتاء بسبب قلة الأنشطة الصناعية وتأثير الأمطار، ويرتفع في الصيف نتيجة للجفاف وارتفاع درجات الحرارة. كما يعود التباين في تركيز الميثان (CH_4) بين الشتاء والصيف إلى تأثيرات المناخ، حيث يكون التلوث أقل في الشتاء ويزداد في الصيف نتيجة للأنشطة الصناعية والنقل.

الكلمات المفتاحية: غازات الاحتباس الحراري، نظم المعلومات الجغرافية، الذكاء الاصطناعي.

المقدمة:

تعد مشكلة غازات الاحتباس الحراري واحدة من أكبر التحديات البيئية التي تواجه العالم في الوقت الحالي، ولا سيما في العراق، الذي يشهد تأثيرات بيئية متزايدة نتيجة لتغير المناخ. في هذا السياق، يعد استخدام الذكاء الاصطناعي ونظم المعلومات الجغرافية (GIS) أدوات قوية ورائدة في رصد ومراقبة هذه الغازات، حيث يمكن أن تساهم هذه التقنيات في تحسين الفهم العلمي لهذه الظاهرة من خلال جمع وتحليل البيانات البيئية بشكل أكثر دقة وكفاءة.

إذ أن الذكاء الاصطناعي يساهم في تحليل كميات ضخمة من البيانات البيئية التي يتم جمعها من مصادر متعددة مثل الأقمار الصناعية والمحطات الأرضية. من خلال الخوارزميات المتقدمة وتقنيات التعلم الآلي، يمكن تحليل هذه البيانات بشكل أسرع وأكثر دقة، مما يساعد على اكتشاف الأنماط والعوامل المؤثرة في مستويات غازات الاحتباس الحراري في مناطق محددة. كما يمكن للذكاء الاصطناعي التنبؤ بمعدلات الانبعاثات في المستقبل بناءً على العوامل المناخية والأنشطة البشرية.

أما نظم المعلومات الجغرافية (GIS)، فهي تؤدي دوراً حيوياً في إدارة وتحليل البيانات البيئية باستخدام الخرائط والنماذج الجغرافية. يمكن من خلال هذه التقنية تمثيل البيانات المتعلقة بمصادر غازات الاحتباس الحراري والمناطق

المتأثرة بها على خرائط جغرافية تفاعلية، مما يسهل اتخاذ القرارات البيئية المبنية على الأدلة. كما تتيح GIS إمكانية دمج وتحليل البيانات من مختلف المصادر مثل الأقمار الصناعية ، مما يعزز من دقة التنبؤات وتقديم حلول فعالة لمكافحة ظاهرة الاحتباس الحراري في العراق.

باستخدام هاتين التقنيتين معاً، يمكن تحسين قدرات الرصد والمراقبة المستمرة لمستويات غازات الاحتباس الحراري، مما يساعد في اتخاذ قرارات استراتيجية للحد من انبعاثاتها والتخفيف من آثار تغير المناخ على البيئة والمجتمعات في العراق.

مشكلة الدراسة:

يعاني العراق من تغيرات بيئية متسارعة نتيجة لارتفاع تركيز غازات الاحتباس الحراري، مما يؤدي إلى تفاقم المشكلات المناخية مثل التصحر، ارتفاع درجات الحرارة، وتغير أنماط الهطول المطري. في ظل هذه التحديات، تبرز الحاجة إلى استخدام تقنيات حديثة مثل الذكاء الاصطناعي (AI) ونظم المعلومات الجغرافية (GIS) لرصد وتحليل هذه التغيرات بطرق أكثر دقة وكفاءة. وعليه، تتمثل المشكلة الرئيسة للدراسة في (كيف يمكن توظيف الذكاء الاصطناعي ونظم المعلومات الجغرافية في رصد ومراقبة تغير بعض غازات الاحتباس الحراري في العراق لعام ٢٠٢٤؟)

فرضية الدراسة:

فرضية الدراسة هي أن استخدام الذكاء الاصطناعي ونظم المعلومات الجغرافية يمكن أن يسهم بشكل فعال في رصد وتحليل تغيرات تركيز هذه الغازات على مستوى العراق، مما يوفر بيانات دقيقة يمكن استخدامها لتوجيه السياسات البيئية وتخفيف الآثار السلبية للتغير المناخي. كما تهدف الدراسة إلى تقديم نماذج تحليلية تساعد في التنبؤ بتوجهات هذه الغازات وتحديد المناطق الأكثر تأثراً بها، مما يدعم اتخاذ القرارات العلمية والسياسية على مستوى الدولة.

أهداف الدراسة:

١- رصد وتحليل التوزيع المكاني لغازات الاحتباس الحراري مثل ثاني أكسيد النيتروجين (NO_2) وأول أكسيد الكربون (CO) وثاني أكسيد الكبريت (SO_2) والميثان (CH_4) في العراق باستخدام بيانات مستشعر TROPOMI-5P لعام ٢٠٢٤.

٢- توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي في معالجة وتحليل البيانات الضخمة المستمدة من الأقمار الصناعية لاستخراج أنماط التلوث بدقة عالية.

٣- دمج نظم المعلومات الجغرافية (GIS) لإنشاء خرائط تفاعلية تعكس التوزيع المكاني للغازات، مع التركيز على المناطق الأكثر تلوثاً مثل المدن الكبرى والمناطق الصناعية وحقول النفط.

٤- تطوير نماذج تنبؤية باستخدام تعلم الآلة للتنبؤ بمستويات التلوث المستقبلية، مما يسهم في تحسين استراتيجيات الحد من الانبعاثات.

٥- دعم صناع القرار والسياسات البيئية من خلال تقديم بيانات دقيقة حول مستويات التلوث، مما يساعد في وضع خطط لمكافحة تغير المناخ وتحسين جودة الهواء.

منهجية الدراسة:

تم استخدام عدة مناهج جغرافية تلائم الدراسة الحالية وهي المنهج الكارتوكرافي الذي يوظف الخرائط والنماذج لفهم الأنماط المكانية للغازات وتحليل التغيرات الزمنية. ثانياً، المنهج البيئي لدراسة تأثير غازات الاحتباس الحراري على النظم البيئية في العراق. ثالثاً، المنهج الكمي الذي يعتمد على التقنيات الإحصائية والرياضية لتحليل بيانات انبعاثات الغازات

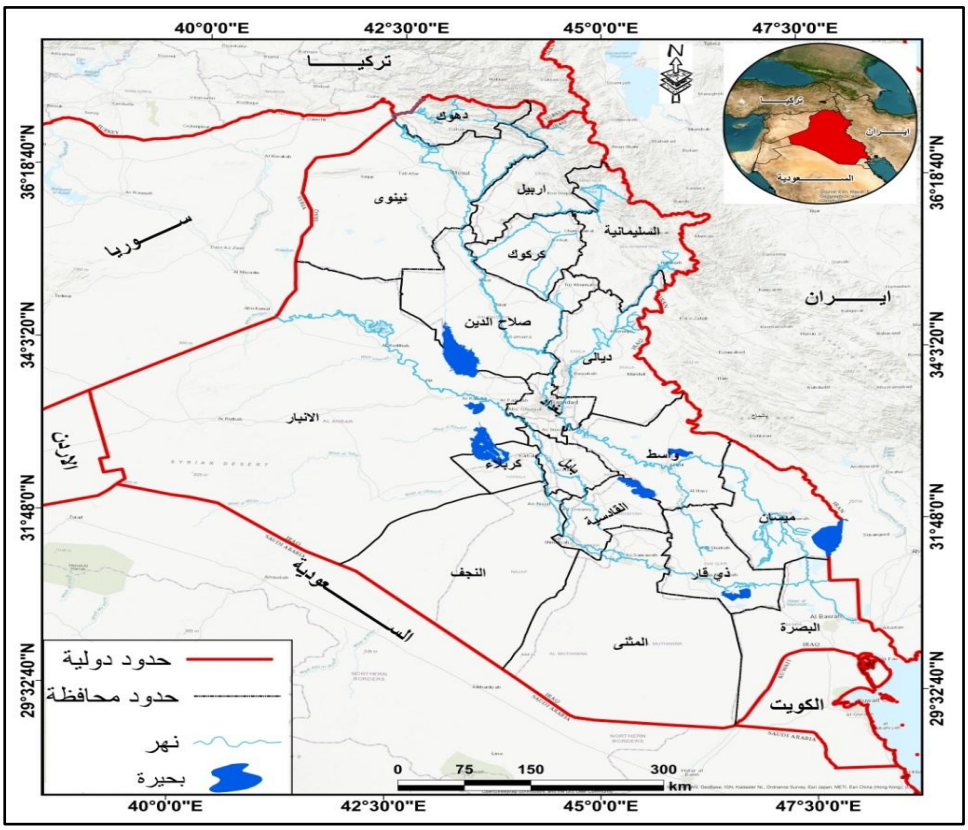
باستخدام الذكاء الاصطناعي. رابعاً، المنهج الجيوتقني الذي يدمج الذكاء الاصطناعي مع نظم المعلومات الجغرافية لتحسين دقة التحليل والتنبؤات البيئية.

موقع منطقة الدراسة:

يقع العراق في الجزء الغربي من قارة آسيا، يحده من الشمال تركيا، ومن الشرق إيران، ومن الغرب سوريا والأردن، ومن الجنوب المملكة العربية السعودية والكويت، ومن الجنوب الشرقي الخليج العربي، فلكياً يقع بين دائرتي عرض(٢٩,٥َ – ٣٧,٥َ) شمالاً، وبين خطي طول (٣٨,٥َ – ٤٨,٥َ) شرقاً.

تبلغ مساحة العراق حوالي (٤٣٨,٣١٧) كيلومتر مربع، مما يجعله من الدول الكبيرة نسبياً في المنطقة. تتنوع هذه المساحة بين أراضٍ زراعية خصبة، وصحاري، ومناطق جبلية، مما يساهم في تنوع بيئته الطبيعية وموارده، ينقسم العراق إدارياً إلى ١٨ محافظة، خريطة (١).

خريطة (١) موقع منطقة الدراسة



المصدر: من عمل الباحث على وزارة الري ،الهيئة العامة للمساحة ، خارطة العراق الادارية، ١/١٠٠٠٠٠٠، ومخرجات برنامج ARCGIS10.8.

آلية وطرق العمل:

١- تقنيات الذكاء الاصطناعي المستخدمة رصد غازات الاحتباس الحراري:

١-١- مقدمة عن Sentinel-5P:

هو قمر صناعي من ضمن برنامج Copernicus الذي أطلقته وكالة الفضاء الأوروبية (ESA) في ١٣ أكتوبر ٢٠١٧. تم تصميم هذا القمر الصناعي خصيصاً لمراقبة الغلاف الجوي للأرض، وبالتحديد لمراقبة تلوث الهواء ودراسة

تغير المناخ. يعد Sentinel-5P جزءاً من سلسلة أقمار صناعية تهدف إلى جمع البيانات حول الملوثات الجوية والغازات الدفيئة التي تؤثر على صحة الإنسان والمناخ(Graaf, K. de et al, 2020) .

١-٢- مقدمة حول جهاز TROPOMI:

جهاز TROPOMI هو جهاز طيفي عالي الدقة موجود على القمر الصناعي Sentinel-5P، ويهدف إلى مراقبة الغلاف الجوي للأرض من خلال قياس تركيزات مختلف الملوثات الجوية. هذا الجهاز يوفر بيانات بدقة زمنية ومكانية عالية للمساعدة في دراسة جودة الهواء على نطاق عالمي التي تتيح قياس مستويات الغازات الضارة مثل الأوزون، وأكاسيد النيتروجين، والكبريت، والكربون الأسود. كما يراقب القمر الصناعي غازات دفيئة مثل ثاني أكسيد الكربون والميثان. القمر الصناعي يوفر بيانات دقيقة حول هذه الملوثات بفضل قدراته في مراقبة الغلاف الجوي على مستوى عالمي، مما يساعد في تقديم معلومات حيوية لتحسين جودة الهواء وحماية الصحة العامة، وكذلك المساهمة في مكافحة تغير المناخ (Faisal M, Prakoso KA, Sanjaya H et al، ٢٠٢١).

تتميز هذه الأداة بكونها مطيافاً شبكياً فوق طيفي يعمل بتقنية الدفع-المسح (push-broom) مع مجال رؤية واسع بزاوية ١٠٨°، مما يمكنها من قياس الأطوال الموجية في ثلاثة نطاقات رئيسية: الأشعة فوق البنفسجية-المرئية (٢٧٠ نانومتر - ٤٩٥ نانومتر)، والأشعة تحت الحمراء القريبة (٦٧٥ نانومتر - ٧٧٥ نانومتر)، والأشعة تحت الحمراء قصيرة الموجة (٢٣٠٥ نانومتر - ٢٣٨٥ نانومتر) (Magro C, Nunes L, Gonçalves O et al، ٢٠٢١).

يهدف Sentinel-5P إلى تقديم قياسات دقيقة وشاملة لعناصر الغلاف الجوي، مثل مكونات كيميائه، والجسيمات العالقة (الهباء الجوي)، والسحب، وذلك بدقة مكانية، زمانية، وطيفية عالية. وتساهم هذه البيانات في تحسين فهمنا لديناميكيات الغلاف الجوي وتأثيراتها على جودة الهواء والمناخ العالمي.

ضمن هذا الإطار، يؤدي مركز بيانات وخدمات معلومات علوم الأرض التابع لناسا (GES DISC) دوراً محورياً في تخزين وإدارة أكثر من ألف مجموعة بيانات متعلقة بتركيب الغلاف الجوي، ودورات المياه والطاقة، وتغير المناخ. يتم تنظيم منتجات Sentinel-5P TROPOMI على مستويين رئيسيين، هما المستوى الأول (L1B)، الذي يشمل بيانات الإشعاع الأولية، والمستوى الثاني (L2)، الذي يوفر معلومات تحليلية متقدمة عن مكونات الغلاف الجوي. ويتم توفير هذه البيانات من قبل الاتحاد الأوروبي ووكالة الفضاء الأوروبية (ESA) بموجب اتفاقية تعاون مع وكالة الفضاء الأمريكية (NASA)، مما يسهم في تعزيز تبادل البيانات العلمية بين الوكالات الدولية (Schneising O، Buchwitz M، و Reuter M، ٢٠١٩).

ولضمان سهولة الوصول إلى هذه البيانات والاستفادة منها، يوفر GES DISC مجموعة من الأدوات والخدمات المتقدمة، مثل OPeNDAP وL2 Subsetting، والتي تسهل على الباحثين والمختصين في مجال الاستشعار عن بُعد تحليل ومعالجة البيانات المعقدة بطرق ميسّرة وفعالة.

تستعرض هذه الدراسة أحدث منتجات TROPOMI، والتي تشمل قياسات إشعاع EarthView (EV)، والإشعاع الشمسي، ومؤشر الهباء الجوي، وتركيز أول أكسيد الكربون، وإجمالي عمود الأوزون، ومستويات ثاني أكسيد النيتروجين، بالإضافة إلى بيانات السحب. كما سيتم تسليط الضوء على أفضل الطرق للوصول إلى هذه البيانات، وسبل عرضها ومعالجتها، مما يسهم في تعزيز البحث العلمي والتطبيقات البيئية المتعلقة بجودة الهواء وتغير المناخ (Vahid Safarianzengir, Behrouz Sobhani, Mohammad Hasan Yazdani , & Mohammadkia Kianian , 2020).

جدول (١) مواصفات أداة TROPOMI

القمر الصناعيSatellite	خصائص Sentinel-5P
المستشعر Sensor	تروبومي TROPOMI
المطياف Spectrometer	مقياس طيف شبكي بنظام المسح الخطي (Push–broom) مع كاشف CCD ثنائي الأبعاد
نطاق التغطية الطيفية Spectral coverage	الأشعة فوق البنفسجية والمرئية UV-VIS: (270–495) نانومتر الأشعة تحت الحمراء القريبة:NIR (675–775) نانومتر الأشعة تحت الحمراء قصيرة المدى: SWIR (2305–2385) نانومتر
الدقة المكانية Spatial resolution	٧ × ٣,٥ كم بالقرب من نقطة التعامد
مجال الرؤية Field–of–View	٢١٠٨° (٢٦٠٠ km)
الدقة الطيفية Spectral resolution	٠,٢٣ – ٠,٥ nm
وقت عبور خط الاستواء المحلي لعقدة الصعود Ascending node equator local crossing time	١٣:٣٠~

(Jian Zeng, Bruce E. Vollmer, Jennifer Wei, Dana M. Ostrenga, & James E. Johnson, 2018)

١-٢-١خوارزمية (TROPOMI- 5P):

تستخدم خوارزمية 5P بشكل رئيسي لتحليل البيانات من جهاز TROPOMI، وهي مصممة لتقديم معلومات دقيقة حول ملوثات الهواء الرئيسية. الاسم 5P يشير إلى خمسة مكونات أساسية في الخوارزمية:

- P–TROPOMI – P1: يتعامل مع معالجة البيانات الملتقطة من TROPOMI باستخدام تقنيات تصحيح وتحليل الطيف.
- P2 - Preprocessing: يشمل عمليات معالجة البيانات الأولية مثل تصحيح التأثيرات الجوية والحسابات الطيفية.
- P3 - Product Retrieval: يشمل استخراج المنتجات البيئية مثل ملوثات الهواء استناداً إلى قياسات طيفية.
- P4 - Postprocessing: مراحل ما بعد المعالجة التي تشمل تصحيح الانحرافات والتحقق من البيانات.
- P5 - Validation: التحقق من صحة البيانات المستخرجة من خلال مقارنة النتائج مع البيانات الأرضية والملاحظات الأخرى (Bijay Halder، وآخرون، ٢٠٢٣).

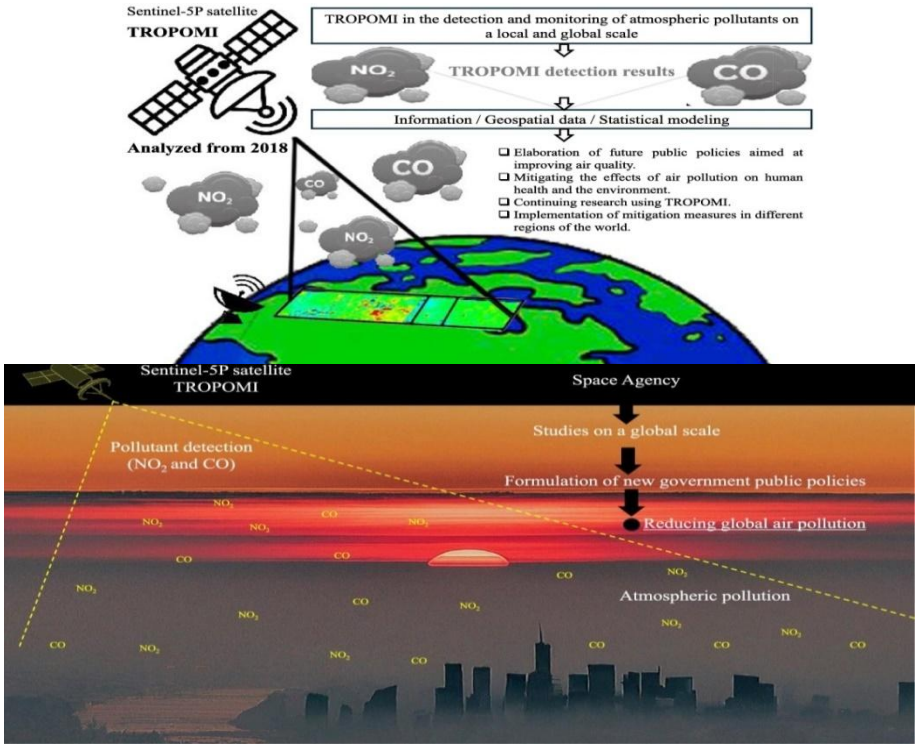
١-٢-٢: عمل الخوارزمية:

- قياس الإشعاع: تقوم أداة TROPOMI بقياس الإشعاع (شدة الضوء) الذي يأتي من سطح الأرض والغلاف الجوي. يشمل ذلك الضوء المنعكس الذي تفاعل مع مكونات مختلفة في الغلاف الجوي.
- نماذج النقل الإشعاعي (Radiative Transfer Models): يتم معالجة الإشعاع المقاس باستخدام نماذج النقل الإشعاعي. تهدف هذه النماذج إلى محاكاة تفاعل ضوء الشمس مع الغازات والهباء الجوي في الغلاف الجوي. يتم ذلك لفهم مقدار الضوء الذي تم امتصاصه أو تبديده بواسطة مكونات الغلاف الجوي المختلفة.
- استرجاع الأطياف: تجمع أداة TROPOMI البيانات عبر مجموعة من الأطياف (من الأشعة فوق البنفسجية إلى تحت الحمراء). تركز الخوارزمية على استرجاع ملامح الامتصاص المرتبطة بالغازات الجوية المحددة. يمتلك كل غاز

نمط امتصاص مميز في الطيف الكهرومغناطيسي، وبالتالي من خلال تحليل القياسات يمكن للخوارزمية تقدير تركيزات الغازات في الغلاف الجوي.

- تصحيح الغيوم والهباء الجوي: يمكن للغيوم والهباء الجوي أن تعيق الإشارات من الغازات في الغلاف الجوي. تستخدم خوارزمية TROPOMI–5P طرقاً متقدمة لاكتشاف الغيوم وتصحيح تأثيرات الهباء الجوي لضمان أن القيم المسترجعة تمثل التركيز الفعلي للغازات، وليس فقط التداخل الناتج عن الجسيمات في الجو.
- معلومات عن السطح والملف الجوي: تقدم TROPOMI معلومات عن انعكاس السطح والملف الجوي (توزيع الغازات مع الارتفاع). تقوم الخوارزمية بمعالجة هذه البيانات لتحسين الحسابات وضمان استرجاع دقيق لتركيزات الغازات بالقرب من سطح الأرض.
- استرجاع العمود الجوي: تقوم الخوارزمية بإنتاج ما يسمى بـ العمود الكلي أو الكثافة العمودية للغازات (VCD)، وهي إجمالي كمية الغاز في عمود من الغلاف الجوي من السطح حتى أعلى الغلاف الجوي. هذا أمر أساسي لفهم العبء العام للملوثات.
- دمج البيانات والتحقق منها: بعد استرجاع البيانات، يتم دمجها في النماذج العالمية والتحقق منها مقارنة بالقياسات الميدانية من أنظمة مراقبة أخرى مثل AERONET (شبكة الروبوتات للأيروسولات) وNDACC (شبكة الكشف عن تغيرات تكوين الغلاف الجوي) ومحطات المراقبة الأرضية (Daniel O. Omokpariola، John N. Nduka، و Patrick L. Omokpariola ، ٢٠٢٤).

شكل (١) آلية عمل خوارزمية TROPOMI- 5P



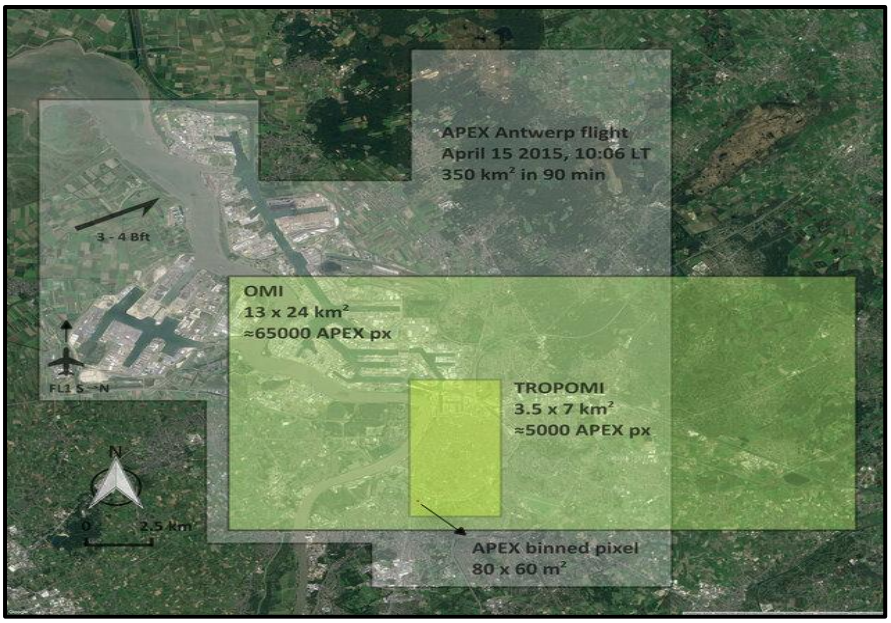
(Jian Zeng, Bruce E. Vollmer, Jennifer Wei, Dana M. Ostrenga, & James E. Johnson, 2018)

١-٢-٣ الدقة التميزية TROPOMI:

يوضح شكل (٢) مقارنة حجم بصمة القمر الصناعي بين Aura/OMI و S5P/TROPOMI كانت تجربة الماسحة الجوية (APEX) حملة طيران جوّي نُفذت في أنتويرب وبروكسل وليل في بلجيكا. يتميز TROPOMI بتغطية طيفية

واسعة ودقة مكانية تبلغ ٣,٥ كم × ٧ كم، مما يعزز قدرة الاستشعار عن بعد للكيمياء الجوية من الفضاء إلى مستوى جديد ومحسن.(Jian Zeng, Bruce E. Vollmer, Jennifer Wei, Dana M. Ostrenga, & James E. Johnson, 2018)

شكل (٢) الدقة التميزية TROPOMI



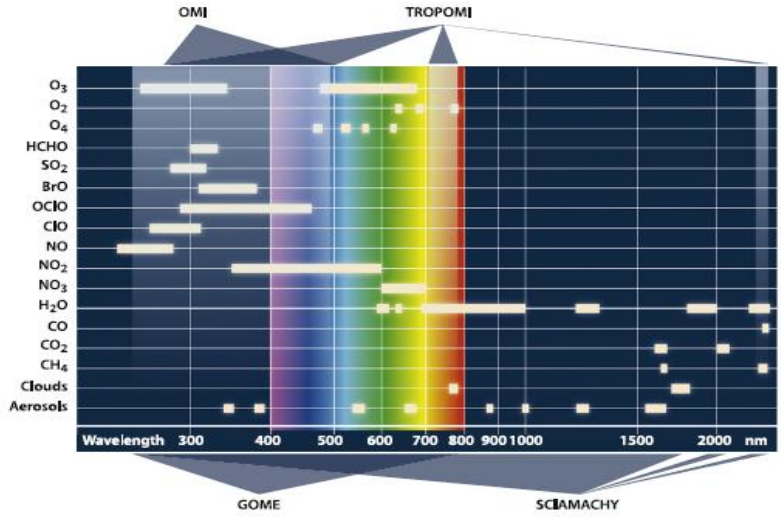
https://terrascope.be/en/satellites/sentinel-5p

١-٢-٤ مبدأ القياس في TROPOMI

تعتمد آلية القياس في **TROPOMI** على التقاط شريط من سطح الأرض على مكشاف ثنائي الأبعاد خلال ثانية واحدة، يتحرك خلالها القمر الصناعي بحوالي ٧ كم، حيث يبلغ عرض الشريط ٢٦٠٠ كم في الاتجاه العرضي و٧ كم في الاتجاه الطولي. وبعد انتهاء القياس، تبدأ عملية جديدة لمتابعة المسح أثناء حركة القمر الصناعي، حيث تُستخدم الأبعاد الثنائية للمكشاف لتمييز البكسلات الأرضية المختلفة في الاتجاه العرضي وفصل الأطوال الموجية باستخدام مطياف الحيود. وتضم الأداة أربعة مكشافات تغطي النطاقات الطيفية المختلفة، مع الإشارة إلى أن النطاق فوق البنفسجي القصير، الذي تقل أطواله الموجية عن ٣٠٠ نانومتر، يمتلك حجم بكسل أرضي أكبر يبلغ ٢١ كم في اتجاه الطيران بدلاً من ٧ كم، وذلك لتحقيق نسبة إشارة إلى ضوضاء مرتفعة من خلال دمج القياس على مدى ٣ ثوانٍ. ونظراً لتركيز TROPOMI على طبقة التروبوسفير، حيث تتغير تركيزات الغازات بسرعة، فإنها تجمع بين التغطية العالمية اليومية والدقة المكانية العالية التي تبلغ ٧×٧ كم². وتغطي الأداة نطاقات طيفية تشمل الأشعة فوق البنفسجية والمرئية بين ٢٧٠–٥٠٠ نانومتر، والأشعة القريبة من تحت الحمراء بين ٦٧٥–٧٧٥ نانومتر، والأشعة تحت الحمراء القصيرة بين ٢٣٠٥–٢٣٨٥ نانومتر، والتي تم اختيارها بعناية لضمان أفضل رصد للغازات والجزيئات ذات الأهمية ضمن الحدود التقنية للبرنامج.

(Jian Zeng, Bruce E. Vollmer, Jennifer Wei, Dana M. Ostrenga, & James E. Johnson, 2018).

شكل(٣) النطاقات الطيفية لـ(TROPOMI) مقارنة بالأدوات السابقة مثل OMI و SCIAMACHY و GOME

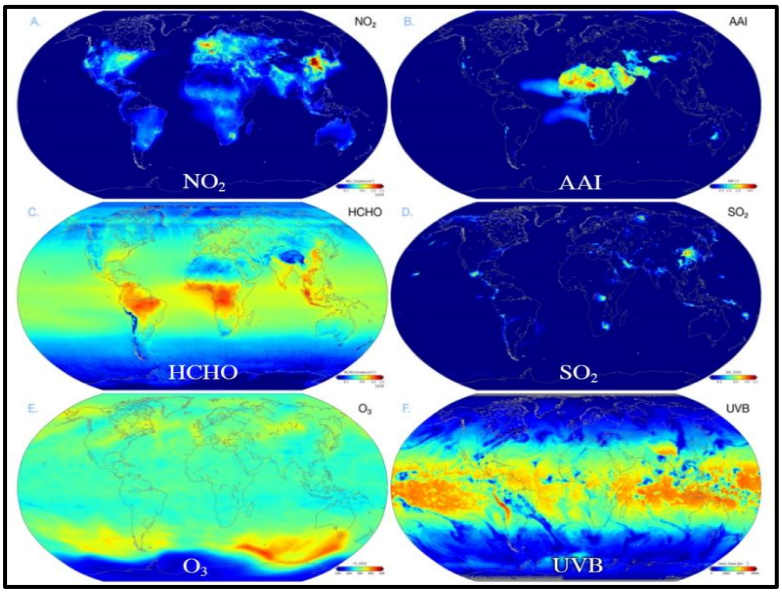


(Veefkind a,g ،Aben b, K و McMullan c ،٢٠١٢)

١-٢-٥ المنتجات التي يوفرها TROPOMI -5P:

نظام S5P/TROPOMI هو جهاز مخصص لقياس وتقييم ملوثات الهواء عبر الأقمار الصناعية، ويعمل على توفير بيانات دقيقة وشاملة حول الغلاف الجوي للأرض. من بين المنتجات الرئيسية التي يوفرهاTROPOMI ، نجد قياسات تركيزات الغازات الملوثة مثل الأوزون، ثاني أكسيد النيتروجين(NO_2) ، ثاني أكسيد الكبريت(SO_2) ، الأمونيا(NH_3) ، الميثان(CH_4) ، أول أكسيد الكربون(CO) ، وجسيمات الهباء الجوي .(Aerosols) يقدم TROPOMI أيضاً معلومات دقيقة حول ظواهر مثل الشفق القطبي وتغيرات الإشعاع الشمسي. يتم استخدام هذه البيانات لمراقبة جودة الهواء على المستوى العالمي، وتحليل التلوث الجوي في المناطق الحضرية، وكذلك لدراسة التأثيرات البيئية للتلوث على الصحة العامة والمناخ.

شكل (٤) منتجات TROPOMI -5P



https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-5P/Data_products

٢- النمذجة المكانية لتغير غازات الاحتباس الحراري في العراق

تُعد النمذجة المكانية أداة مهمة لدراسة التغيرات في تركيزات غازات الاحتباس الحراري (GHGs) في العراق، حيث تعتمد على تقنيات نظم المعلومات الجغرافية (GIS) والاستشعار عن بُعد (RS) لتحليل أنماط الانبعاثات وتغيراتها عبر الزمن والمكان.

وتكمن أهمية النمذجة المكانية في رصد التغيرات الموسمية التي تهدف لتحديد الوقت والمناطق التي تشهد ارتفاعات ملحوظة في الانبعاثات، فضلاً عن توجيه السياسات البيئية: استناداً إلى البيانات المكانية الدقيقة، يمكن توجيه الجهود للحد من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري، بالإضافة التوعية والتخطيط: توفير خرائط مرئية يمكن استخدامها للتوعية العامة وصنع القرار.

وهنا تم رصد ومراقبة غازات الاحتباس الحراري لعام (٢٠٢٤) في العراق من خلال فصلي الصيف والشتاء، إذ يهدف إلى فهم التأثيرات البيئية والمناخية المرتبطة بالانبعاثات الموسمية لهذه الغازات. يساهم هذا الرصد في تحديد المناطق الأكثر تضرراً، وتقييم فعالية السياسات البيئية، وتقديم توصيات لتحسين جودة الهواء والحد من التأثيرات السلبية للاحتباس الحراري. فيما يلي رصد غازات الاحتباس الحراري على اساس الفصول:

٢-١ ثاني أكسيد النيتروجين(Nitrogen dioxide: NO_2):

ثاني أكسيد النيتروجين (NO_2) هو أحد غازات الاحتباس الحراري المهمة التي تساهم في تغير المناخ وزيادة الاحتباس الحراري. في العراق، يشكل NO_2 تحدياً بيئياً ملحوظاً، خاصة في المناطق الحضرية والمناطق الصناعية حيث تتزايد انبعاثاته نتيجة للأنشطة البشرية المختلفة. يتم إطلاق ثاني أكسيد النيتروجين بشكل رئيسي من خلال احتراق الوقود الأحفوري، مثل البنزين والديزل، في وسائل النقل والمصانع ومحطات توليد الطاقة. هذا الغاز يلعب دوراً مزدوجاً في تأثيره البيئي؛ فهو ليس فقط ملوثاً للهواء يمكن أن يسبب مشاكل صحية مثل أمراض الجهاز التنفسي، بل أيضاً له تأثير غير مباشر على تغير المناخ(Verbeek, 2024) .

يشير جدول (٢) وشكل (٥) هناك تتفاوت في مستويات تركيز ثاني أكسيد النيتروجين (NO_2) في العراق بين فصلي الشتاء والصيف، ويعود ذلك إلى عدة عوامل مناخية وبشرية تؤثر على تلوث الهواء. في فصل الشتاء، نلاحظ أن تركيز NO_2 في الشتاء يميل إلى الارتفاع في فئات التركيز العالي جداً والعالي بنسبة (١١,٢٨%) و (٩,٤٢%) على التوالي، وذلك بسبب زيادة النشاطات البشرية مثل استخدام وسائل النقل والأنشطة الصناعية، حيث تزداد الحاجة إلى التدفئة في هذه الفترة. كما أن الظروف الجوية الباردة وتدني سرعة الرياح التي تؤدي إلى تراكم الملوثات في الجو وعدم انتشارها، مما يعزز من تركيز التلوث في بعض المناطق. وعلى الرغم من هذا، يظهر تركيز منخفض جداً بنسبة (٧١,٥٣%) بسبب تأثير معدلات هطول الأمطار التي تسهم في غسل الهواء وتنقيته من الملوثات، بالإضافة إلى أن درجات الحرارة المنخفضة تحد من بعض الأنشطة التي تساهم في التلوث.

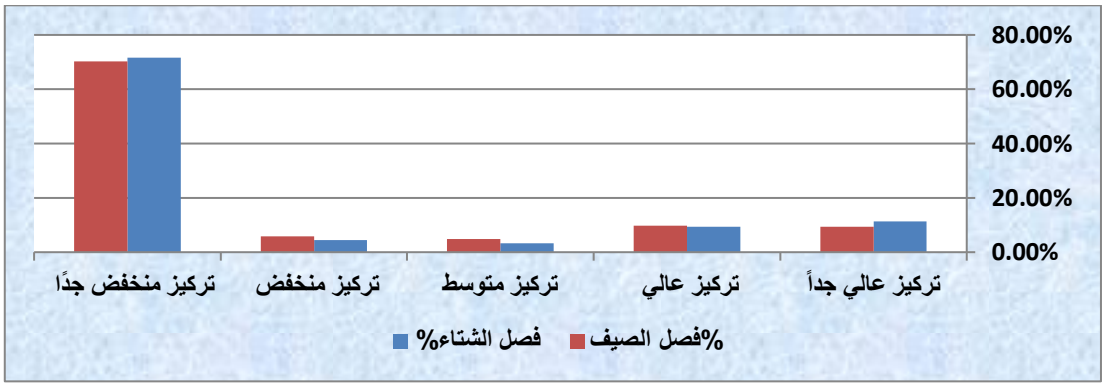
أما في فصل الصيف، يلاحظ ارتفاع تركيز NO_2 حيث تظهر فئات التركيز العالي جداً والعالي بنسبة (٩,٣٠%) و (٩,٨٤%) على التوالي، ويرجع ذلك إلى زيادة الأنشطة الصناعية والزراعية، بالإضافة إلى زيادة استخدام وسائل النقل. كما أن ارتفاع درجات الحرارة يعزز من النشاط الصناعي ويزيد من استهلاك الطاقة، مما يسهم في زيادة انبعاثات الملوثات، مما يؤدي إلى تركيز أعلى للملوثات مقارنة بالشتاء. ومع ذلك، يظهر تركيز منخفض جداً بنسبة (٧٠,٣٣%) في الصيف بسبب التحسين النسبي في الرياح التي تساعد على نقل الملوثات إلى مناطق أخرى، فضلاً عن أن بعض المناطق تتميز بغطاء نباتي يساعد في امتصاص التلوث الجوي.

شكل (٢) مساحة والنسبة المئوية لتركيز ثاني أكسيد النيتروجين(NO_2) في العراق لعام ٢٠٢٤

الصنف	تركيز _ (mol/m^2)	فصل الشتاء/ كم^2	%	فصل الصيف/ كم^2	%
تركيز عالي جداً	8.75E-5 – 1.0E-4	49219.22	11.28	40584.78	9.30
تركيز عالي	6.25E-5 – 8.75E-5	41121.57	9.42	42971.43	9.84
تركيز متوسط	3.75E-5 – 6.25E-5	14729.27	3.38	20913.33	4.79
تركيز منخفض	1.25E-5 – 3.75E-5	19162.06	4.39	25046.90	5.74
تركيز منخفض جداً	0.0 – 1.25E-5	312109.15	71.53	306968.74	70.33
المجموع		436341.27	100	436485.19	100

المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على خريطة (٢).

شكل (٥) النسبة المئوية لتركيز ثاني أكسيد النيتروجين(NO2) العراق لعام ٢٠٢٤



المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على جدول(٢).

توضح بيانات الجدول (٣) والشكل (٦) هناك تباين في تركيز ثاني أكسيد النيتروجين (NO_2) في مختلف المحافظات العراقية خلال فصلي الشتاء والصيف. في المحافظات الشمالية، مثل نينوى التي تسجل ارتفاعاً ملحوظاً في فصل الشتاء بنسبة ٦٣,٥١% من التركيز المنخفض جداً، يرجع ذلك إلى قلة الأنشطة الصناعية واستخدام وسائل التدفئة. بينما في الصيف، تشهد نينوى انخفاضاً في التركيزات العالية جداً والعالية، حيث تهيمن الفئات المنخفضة جداً بنسبة ٥٦,٥٤%، مما يعكس تأثير درجة الحرارة العالية التي تؤدي إلى تبخر التلوث. أما في أربيل، فتظهر نسبة مرتفعة جداً في الشتاء تصل إلى ٣٣,٣٨%، بينما تنخفض بشكل ملحوظ في الصيف إلى ١,٩٦%، وهو ما يعزى إلى تقليل الأنشطة الصناعية في فصل الصيف. بالنسبة إلى دهوك، يظهر في فصل الشتاء تركيز عالٍ يصل إلى ٣٩,٩٣%، ويعود ذلك إلى تراكم الملوثات بسبب انخفاض درجات الحرارة، بينما في الصيف، تنخفض النسبة إلى ٦,٥١% بسبب تأثير درجات الحرارة المرتفعة.

أما في المحافظات الوسطى، مثل بغداد التي تشهد في فصل الشتاء زيادة في التركيزات العالية جداً (٤٢,٩٢%) والعالية (٣٠,٨٥%) بسبب كثافة الحركة المرورية والأنشطة الصناعية، في الصيف تنخفض النسب إلى ٥,٤٩% عالي جداً و٣,٨٦% عالي، مما يشير إلى قلة استخدام وسائل التدفئة وانخفاض التركيزات. في بابل، تظهر في الشتاء نسب مرتفعة (٣٣,١١%) مقارنة بالصيف حيث تنخفض النسب العالية إلى ٧,٠٩%، مما يعكس تأثير الحركة المرورية والصناعية في الشتاء. وفي ديالى، تشهد المحافظة في فصل الشتاء زيادة في التركيزات العالية (٢٢,٣٣%)، بينما في الصيف تنخفض النسبة إلى ١٠,٣٨%، نتيجة لانخفاض الأنشطة الصناعية وتقلص التأثير البشري في الصيف.

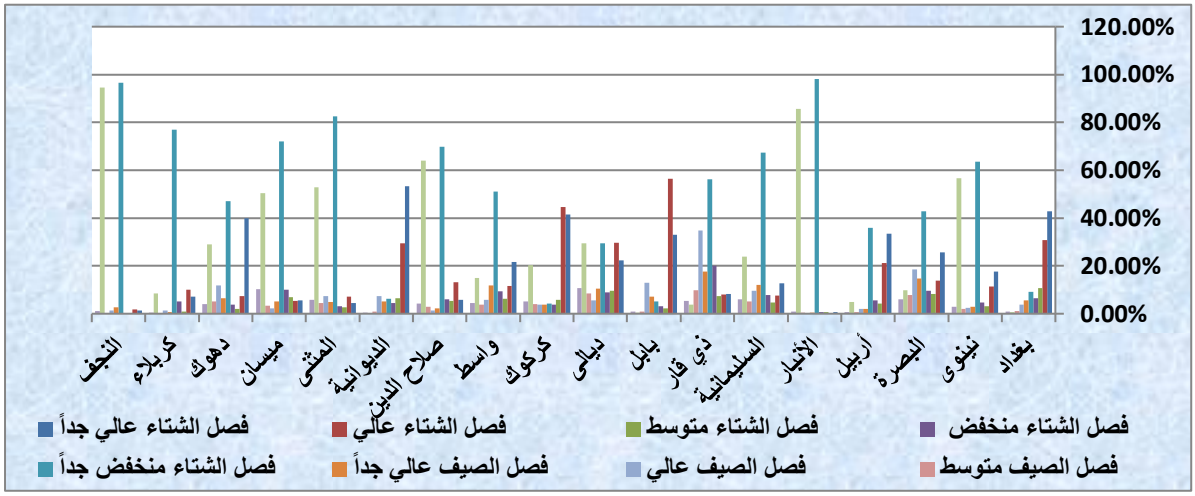
أما في المحافظات الجنوبية، مثل البصرة التي تسجل في الشتاء زيادة في التركيزات العالية جداً (٢٥,٦٣%) والعالية (١٣,٧٦%)، فتقل النسب في الصيف إلى ١٤,٧٠% عالي جداً، ويرجع ذلك إلى تأثير الحرارة التي تساهم في تبخر الوقود وانبعاثات المركبات. أما في ذي قار، فتظهر في الشتاء نسبة مرتفعة من التركيزات المنخفضة جداً تصل إلى ٥٦,١٠%، بينما في الصيف تزداد النسب العالية إلى ١٧,٥٨%، مما يعكس تأثير درجات الحرارة العالية التي تزيد من الانبعاثات. وفي المثنى، تسجل في فصل الشتاء نسبة مرتفعة من التركيزات المنخفضة جداً (٨٢,٤٠%)، في فصل الصيف، تزداد نسب تلوث الهواء بشكل كبير نتيجة لمجموعة من العوامل البيئية والأنشطة البشرية. حيث تتزايد درجات الحرارة بشكل ملحوظ، مما يؤدي إلى حدوث تفاعلات كيميائية في الغلاف الجوي تشجع على تكوين غازات ملوثة مثل ثاني أكسيد النيتروجين. هذا الغاز ينبعث بشكل رئيسي من حركة المركبات وعمليات الاحتراق الصناعي، مما يسبب تراكم هذه الغازات في الجو. بالإضافة إلى ذلك، يشهد فصل الصيف حركة مرورية أكبر وزيادة في النشاط الصناعي، مما يسهم بشكل أكبر في تلوث الهواء بهذه المركبات والغازات الضارة.

جدول (٣) النسبة المئوية لمساحة ثاني أكسيد النيتروجين(NO_2) على مستوى محافظات العراق لعام ٢٠٢٤

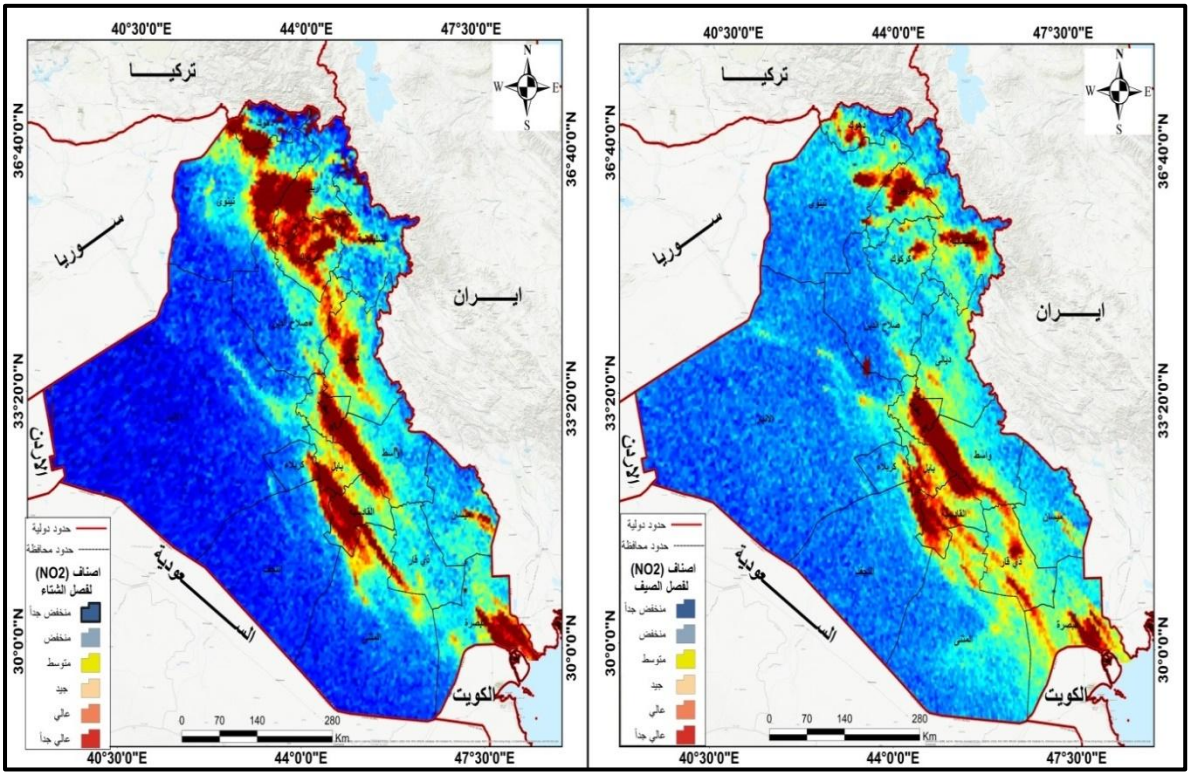
المحافظات	فصل الشتاء					فصل الصيف				
	عالي جداً	عالي	متوسط	منخفض	منخفض جداً	عالي جداً	عالي	متوسط	منخفض	منخفض جداً
بغداد	42.92%	30.85%	10.62%	6.51%	9.10%	5.49%	3.86%	1.01%	0.61%	0.87%
نينوى	17.51%	11.29%	3.09%	4.59%	63.51%	2.89%	2.49%	2.01%	56.54%	2.90%
البصرة	25.63%	13.76%	8.32%	9.57%	42.71%	14.70%	18.40%	7.76%	9.72%	6.06%
أربيل	33.38%	21.11%	4.24%	5.47%	35.80%	1.96%	2.03%	0.70%	5.02%	0.71%
الأنبار	0.57%	0.05%	0.58%	0.74%	98.06%	0.41%	0.26%	0.54%	85.55%	0.91%
السليمانية	12.74%	7.50%	4.57%	7.78%	67.40%	11.98%	9.68%	5.23%	23.92%	5.91%
ذي قار	8.26%	8.08%	7.42%	20.14%	56.10%	17.58%	34.79%	9.74%	3.87%	5.37%
بابل	33.11%	56.36%	2.33%	3.11%	5.09%	7.09%	12.91%	0.99%	0.37%	0.90%
ديالى	22.33%	29.62%	9.59%	8.99%	29.48%	10.38%	5.52%	8.44%	29.50%	10.81%
كركوك	41.51%	44.69%	5.70%	3.83%	4.27%	3.85%	3.76%	4.00%	20.35%	5.13%
واسط	21.54%	11.67%	6.34%	9.32%	51.14%	11.91%	5.72%	3.76%	15.04%	4.46%
صلاح الدين	5.72%	13.07%	5.41%	5.98%	69.82%	2.17%	1.39%	2.92%	63.90%	4.29%
الديوانية	53.36%	29.50%	6.47%	4.40%	6.27%	5.23%	7.37%	0.82%	0.24%	0.44%
المثنى	4.55%	7.17%	2.76%	3.11%	82.40%	4.91%	7.43%	4.53%	52.94%	5.89%
ميسان	5.50%	5.42%	6.90%	10.05%	72.14%	5.18%	2.28%	3.45%	50.49%	10.15%
دهوك	39.93%	7.30%	1.90%	3.87%	46.99%	6.51%	11.93%	5.04%	28.98%	4.08%
كربلاء	7.07%	10.06%	0.92%	5.10%	76.85%	0.71%	1.24%	0.27%	8.48%	0.51%
النجف	1.39%	1.71%	0.20%	0.08%	96.62%	2.75%	1.38%	0.30%	94.46%	1.11%

المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على خريطة (٢).

شكل (٦) النسبية المئوية لمساحة ثاني أكسيد النيتروجين (NO_2) على مستوى محافظات العراق لعام ٢٠٢٤



خريطة (٢) التوزيع المكاني لغاز (NO_2) خلال فصلي الصيف والشتاء في العراق لعام ٢٠٢٤



المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على بيانات القمر الصناعي (Sentinel-5P).

٢-٢ أول أكسيد الكربون (CO:Carbon monoxide):

هو غاز عديم اللون والرائحة، يعد من بين الغازات المؤثرة في ظاهرة الاحتباس الحراري. في العراق، تساهم الانبعاثات الناتجة عن أنشطة بشرية متنوعة مثل احتراق الوقود الأحفوري في توليد أول أكسيد الكربون. يعتبر هذا الغاز أحد العوامل التي تؤدي إلى زيادة درجات الحرارة العالمية، حيث يساهم في احتجاز الحرارة في الغلاف الجوي. وعلى الرغم من أن أول أكسيد الكربون ليس من أقوى الغازات المسببة للاحتباس الحراري مثل ثاني أكسيد الكربون أو الميثان، إلا أن تركيزه في الغلاف الجوي له تأثير ملحوظ. في العراق، يعزز استخدام السيارات القديمة والمصانع التي تعتمد على

الوقود الأحفوري من مستويات أول أكسيد الكربون، مما يساهم في زيادة التلوث الهوائي وتفاقم التغيرات المناخية. كما أن تزايد عدد السيارات وتوسيع المناطق الصناعية في المدن الكبرى يعزز من مستويات هذا الغاز، مما يؤدي إلى تفاقم المشاكل البيئية والصحية (Edwards,T. R. و Davis, J. P. ، ٢٠٢٣).

تشير بيانات الجدول (٤) والشكل (٧) هناك تباين واضح في تركيز أول أكسيد الكربون (CO) بين فصلي الشتاء والصيف في العراق لعام ٢٠٢٤، حيث يظهر تأثير العوامل المناخية بشكل واضح على التركيزات. في فصل الشتاء، يسود التركيز المنخفض جداً والمنخفض، حيث تغطي فئة التركيز المنخفض(٠,٠٣٧٥ mol/m²) مساحة (٣٤٦٨٦٧,٠٩ كم²، أي (٧٩,٥٢%) من مساحة العراق، بينما فئة التركيز المنخفض جداً (٠,٠١٢٥ mol/m²) تغطي (٨٩٣٤٧,٨٠ كم² بنسبة (٢٠,٤٨%). لم تُسجل أي مناطق ضمن الفئات المتوسطة أو العالية أو العالية جداً خلال هذا الفصل. يعود هذا الانخفاض إلى عدة عوامل مناخية، أبرزها انخفاض درجات الحرارة التي تحد من التفاعلات الكيميائية في الغلاف الجوي، بالإضافة إلى زيادة معدلات الأمطار التي تساعد تحسين جودة الهواء عن طريق إزالة الملوثات، بما في ذلك أول أكسيد الكربون.

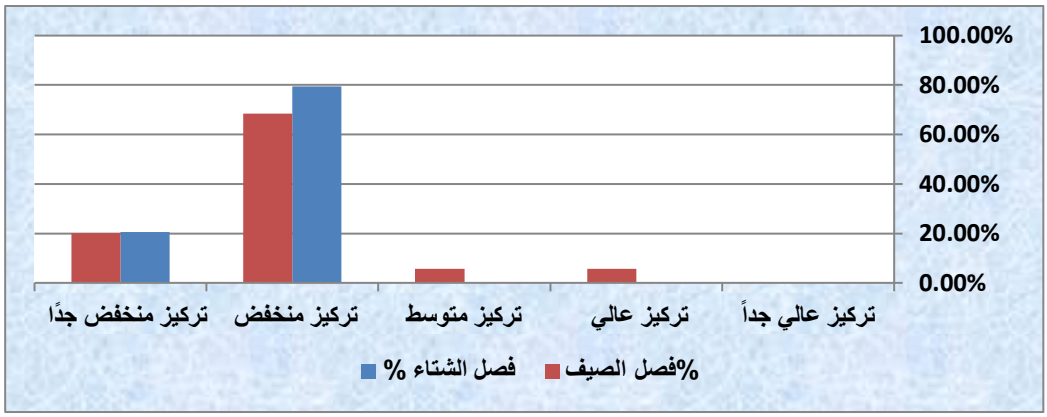
أما في فصل الصيف، فيظهر الارتفاع الملحوظ في تركيز أول أكسيد الكربون، حيث تغطي فئة التركيز العالي (٠,٠٨٧٥ mol/m²) مساحة (٢٤٧١٥,٩١) كم² بنسبة (٥,٦٧%)، وفئة التركيز المتوسط (٠,٠٦٢٥ mol/m²) تغطي (٢٥١٤٢,٢٠) كم² بنسبة (٥,٧٦%). بينما تسجل فئة التركيز المنخفض (٠,٠٣٧٥ mol/m²) مساحة (٢٩٨٢٤٩,٣٠ كم² بنسبة (٦٨,٣٧%). يعكس ارتفاع مستويات أول أكسيد الكربون في الصيف تأثير درجات الحرارة المرتفعة التي تزيد من التفاعلات الكيميائية في الغلاف الجوي، مما يؤدي إلى زيادة تركيزات هذا الغاز. بالإضافة إلى ذلك، يمكن أن يؤدي الجفاف وقلة الأمطار في الصيف إلى تقليل قدرة الغلاف الجوي على إزالة الملوثات، مما يساهم في ارتفاع مستويات أول أكسيد الكربون. كما أن الأنشطة البشرية، مثل زيادة حركة المركبات وتوسع الصناعات خلال الصيف، تسهم في رفع انبعاثات الغازات الملوثة، مما يؤدي إلى تركيز أعلى لأول أكسيد الكربون في الهواء مقارنة بفصل الشتاء.

شكل (٤) مساحة والنسبة المئوية لتركيز أول أكسيد الكربون (CO) في العراق لعام ٢٠٢٤

الصنف	تركيز _ (mol/m²)	فصل الشتاء/ كم²	%	فصل الصيف/ كم²	%
تركيز عالي جداً	أكثر من 0.1	-	-	-	-
تركيز عالي	0.0875	-	-	24715.91	**5.67**
تركيز متوسط	0.0625	-	-	25142.20	**5.76**
تركيز منخفض	0.0375	346867.09	79.52	298249.30	**68.37**
تركيز منخفض جداً	0.0125	89347.80	20.48	88126.20	**20.20**
المجموع		436214.89	100	436233.61	**100**

المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على خريطة (٣).

شكل (٧) النسبة المئوية لتركيز أول أكسيد الكربون (CO) العراق لعام ٢٠٢٤



المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على جدول(٤).

يتضح من الجدول (٥) والشكل (٨) وجود تباين تركيز أول أكسيد الكربون (CO) بين المحافظات العراقية خلال فصلي الشتاء والصيف، في المحافظات الشمالية مثل نينوى (٤٣,٣٠%)، أربيل (٥١,٦٧%)، السليمانية (١٣,٢٤%)، كركوك (١٧,٩١%)، ودهوك (٤٧,٠٥%)، تكون مستويات أول أكسيد الكربون خلال الشتاء منخفضة إلى منخفضة جداً، ويعود ذلك إلى انخفاض درجات الحرارة التي تحد من الانبعاثات الناتجة عن المركبات والأنشطة الصناعية، إضافةً إلى التضاريس الجبلية والغطاء النباتي الذي يساهم في تقليل تراكم الملوثات. أما في الصيف، فتشهد بعض المحافظات الشمالية زيادة ملحوظة في التركيز المتوسط والعالي، كما هو الحال في نينوى (٤,٧٦% عالي، ٩,٠٧% متوسط) وكركوك، نتيجة ارتفاع درجات الحرارة التي تؤدي إلى زيادة استهلاك الوقود الأحفوري والانبعاثات من المركبات والصناعات.

في المحافظات الوسطى مثل بغداد، الأنبار، ديالى، بابل، صلاح الدين، واسط، كربلاء، والنجف، تسود الفئات المنخفضة والمنخفضة جداً خلال الشتاء، كما هو الحال في الأنبار (١١,٧٨%)، ديالى (٣٥,٦١%)، وكربلاء (١٩,٢٦%)، وذلك بسبب قلة استخدام وسائل التدفئة المعتمدة على الوقود مقارنة بالمناطق الباردة، بالإضافة إلى دور الرياح في تقليل تركيز الملوثات، في الصيف، تشهد بعض المحافظات مثل بغداد (١٤,٩٤% عالي، ٧,٢١% متوسط) وديالى (٢٩,٠٩% عالي) زيادة ملحوظة بسبب الكثافة السكانية العالية، وارتفاع حركة المرور، والأنشطة الصناعية، مما يؤدي إلى ارتفاع نسب التلوث.

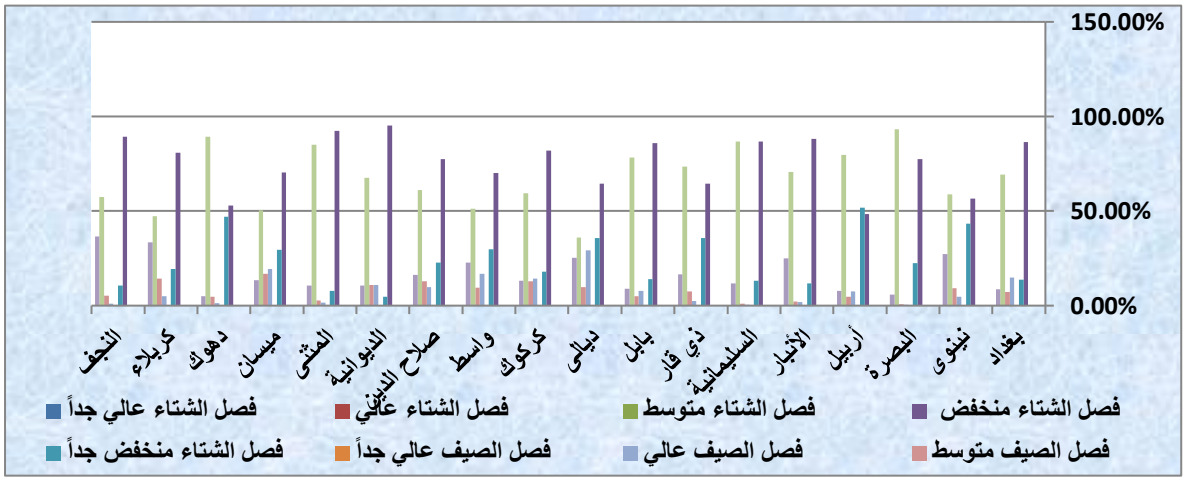
أما في المحافظات الجنوبية مثل البصرة، ذي قار، الديوانية، المثنى، وميسان، فتظهر مستويات منخفضة إلى منخفضة جداً خلال الشتاء، كما في البصرة (٢٢,٥٨%)، المثنى (٧,٦٨%)، وميسان (٢٩,٥٣%)، نظراً لقلة النشاط الصناعي خلال فصل الشتاء وانخفاض استخدام الوقود للتدفئة، فإن هذه العوامل تؤدي إلى تقليل الانبعاثات الملوثة في الهواء. فعدم الحاجة إلى تشغيل المصانع بكامل طاقتها وعدم استخدام كميات كبيرة من الوقود للتدفئة يقللان من مستويات التلوث في الجو خلال هذه الفترة. بينما في الصيف، تزداد المستويات المرتفعة في بعض المحافظات مثل البصرة (٩٣,١٤% منخفض، ٥,٨٤% منخفض جداً) وميسان (١٩,٣٠% عالي، ١٦,٦٩% متوسط)، بسبب ارتفاع درجات الحرارة التي تزيد من معدلات تبخر الوقود وانبعاثات المركبات، إلى جانب التأثير الكبير لمحطات توليد الطاقة.

جدول (٥) النسبة المئوية لمساحة أول أكسيد الكربون (CO) على مستوى محافظات العراق لعام ٢٠٢٤

المحافظات	فصل الشتاء					فصل الصيف				
	عالي جداً	عالي	متوسط	منخفض	منخفض جداً	عالي جداً	عالي	متوسط	منخفض	منخفض جداً
بغداد	-	-	-	86.40%	13.60%	-	14.94%	7.21%	69.34%	8.51%
نينوى	-	-	-	56.70%	43.30%	-	4.76%	9.07%	58.84%	27.33%
البصرة	-	-	-	77.42%	22.58%	-	0.34%	0.68%	93.14%	5.84%
أربيل	-	-	-	48.33%	51.67%	-	7.50%	4.83%	79.81%	7.87%
الأنبار	-	-	-	88.22%	11.78%	-	1.85%	2.28%	70.80%	25.07%
السليمانية	-	-	-	86.76%	13.24%	-	0.47%	1.10%	86.83%	11.60%
ذي قار	-	-	-	64.39%	35.61%	-	2.35%	7.50%	73.57%	16.58%
بابل	-	-	-	85.97%	14.03%	-	7.93%	5.02%	78.23%	8.82%
ديالى	-	-	-	64.39%	35.61%	-	29.09%	9.76%	35.99%	25.16%
كركوك	-	-	-	82.09%	17.91%	-	14.30%	12.95%	59.52%	13.23%
واسط	-	-	-	70.08%	29.92%	-	16.68%	9.49%	51.09%	22.74%
صلاح الدين	-	-	-	77.32%	22.68%	-	9.88%	12.90%	61.07%	16.15%
الديوانية	-	-	-	95.31%	4.69%	-	10.89%	11.00%	67.50%	10.60%
المثنى	-	-	-	92.32%	7.68%	-	1.55%	2.78%	85.10%	10.57%
ميسان	-	-	-	70.47%	29.53%	-	19.30%	16.69%	50.49%	13.52%
دهوك	-	-	-	52.95%	47.05%	-	1.20%	4.67%	89.23%	4.90%
كربلاء	-	-	-	80.74%	19.26%	-	5.09%	14.31%	47.26%	33.34%
النجف	-	-	-	89.31%	10.69%	-	0.95%	5.14%	57.28%	36.63%

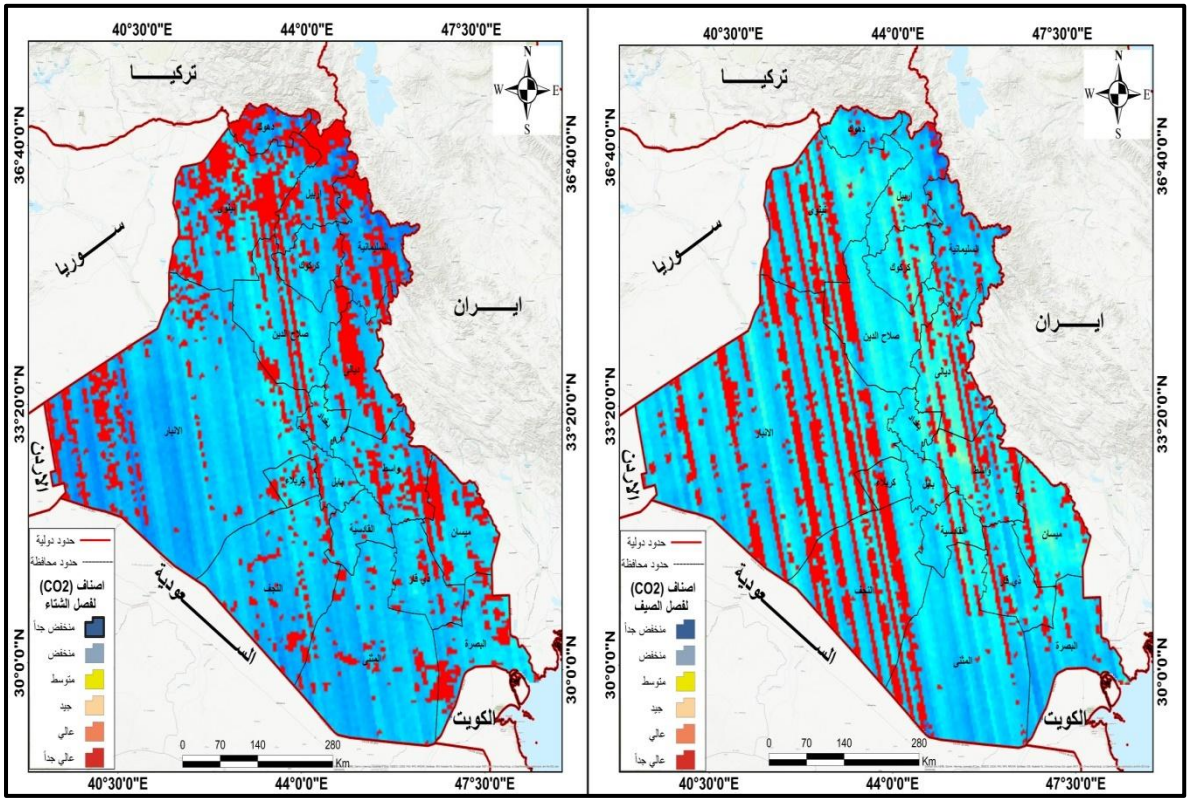
المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على خريطة (٣).

شكل (٨) النسبة المئوية لمساحة ثاني أول أكسيد الكربون (CO) على مستوى محافظات العراق لعام ٢٠٢٤



المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على جدول(٥).

خريطة (٣) التوزيع المكاني لغاز (CO) خلال فصلي الصيف والشتاء في العراق لعام ٢٠٢٤



المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على بيانات القمر الصناعي (Sentinel-5P).

٣-٢ ثاني أكسيد الكبريت (Sulfur dioxide: SO_2):

هو أحد الغازات التي تؤدي دوراً مهماً في الاحتباس الحراري والتلوث البيئي في العراق. يُنتج هذا الغاز أساساً من احتراق الوقود الأحفوري مثل الفحم والنفط، وهو ما يتسبب في إطلاق كميات كبيرة من ثاني أكسيد الكبريت إلى الغلاف الجوي. عندما يتفاعل ثاني أكسيد الكبريت مع بخار الماء في الجو، يتكون حمض الكبريتيك الذي يسهم في حدوث الأمطار الحمضية. هذه الأمطار الحمضية يمكن أن تؤثر سلباً على جودة التربة والمياه والغطاء النباتي، مما يسبب تدهوراً في البيئة الزراعية ويؤثر على الصحة العامة (Ćirišan Ana، Zorica Podraščanin، Ljiljana Nikolić، Bujanović، Sanja Mrazovac Kurilić ، و Predrag Ilić، ٢٠٢٣).

في العراق يعد ثاني أكسيد الكبريت من المشكلات البيئية البارزة، نظراً لاعتماد البلاد الكبير على الوقود الأحفوري كمصدر للطاقة، بالإضافة إلى التوسع الصناعي والنمو السكاني. هذا الاستخدام المكثف للوقود الأحفوري يساهم في زيادة انبعاثات ثاني أكسيد الكبريت ويؤدي إلى تلوث الهواء. نتيجة لذلك، يعاني العراق من مشاكل في جودة الهواء، والتي يمكن أن تؤدي إلى تفاقم مشاكل الصحة العامة مثل الأمراض التنفسية وأمراض القلب، فضلاً عن ذلك يؤدي ثاني أكسيد الكبريت دوراً في تغير المناخ من خلال تأثيره على جودة الهواء وإنتاج الأحماض التي تؤثر على البيئة. ومن هنا، تأتي أهمية مراقبة وتنظيم انبعاثات ثاني أكسيد الكبريت لتقليل تأثيراته السلبية على البيئة والصحة العامة.

تشير البيانات الجدول (٦) والشكل (٩) هناك تباين واضح في تركيز ثاني أكسيد الكبريت (SO_2) بين فصلي الشتاء والصيف في العراق لعام ٢٠٢٤. حيث يسيطر التركيز المنخفض خلال فصل الشتاء بنسبة (٩٥,٨٦%) بمساحة تبلغ (٤١٨٣٤٦,٧٠)كم^2، بينما يكون التركيز المنخفض جداً أقل انتشاراً بنسبة (٤,١٤%) وبمساحة (١٨٠٤٥,٧١) كم^2. يعود هذا الانخفاض الملحوظ إلى العوامل المناخية الشتوية مثل زيادة معدلات الهطول المطري التي تعمل على تنظيف

الغلاف الجوي من الملوثات، إضافةً إلى انخفاض درجات الحرارة التي تحدّ من النشاط الكيميائي والتفاعلات المؤدية إلى زيادة الانبعاثات الغازية.

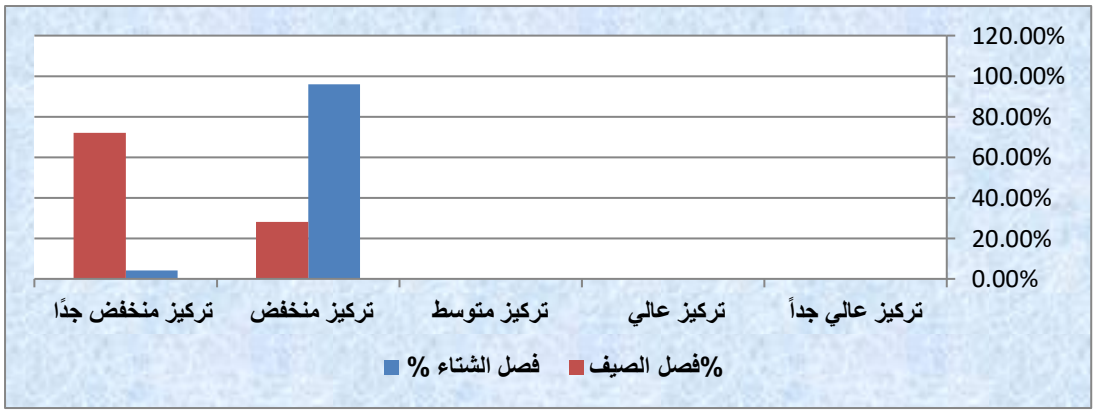
أما في فصل الصيف، فيشهد توزيع التركيز تغيراً ملحوظاً، حيث ينخفض انتشار التركيز المنخفض إلى (٢٨,٠٦%) بمساحة (١٢٢٣٦٣,٠٦) كم^2، بينما يزداد انتشار التركيز المنخفض جداً ليصل إلى (٧١,٩٤%) بمساحة (٣١٣٧٤٤,٧٤) كم^2. يمكن تفسير هذا التحول بتأثير درجات الحرارة المرتفعة التي تؤدي إلى تشتت الملوثات بسرعة، كما أن قلة الأمطار تقلل من قدرة الغلاف الجوي على تنظيف الهواء. إضافةً إلى ذلك، فإن زيادة استهلاك الوقود الأحفوري لتشغيل محطات الطاقة والتبريد في فصل الصيف قد يكون لها تأثير محدود مقارنة بالعوامل الطبيعية المسيطرة على توزيع تركيز SO_2.

شكل (٦) مساحة والنسبة المئوية لتركيز ثاني أكسيد الكبريت (SO_2) في العراق لعام ٢٠٢٤

الصنف	تركيز _ (mol/m²)	فصل الشتاء/ كم^2	%	فصل الصيف/ كم^2	%
تركيز عالي جداً	8.75E-3 – 1E-2	-	-	-	-
تركيز عالي	6.25E-3 – 8.75E-3	-	-	-	-
تركيز متوسط	3.75E-3 – 6.25E-3	-	-	-	-
تركيز منخفض	1.25E-3 – 3.75E-3	418346.70	95.86	122363.06	28.06
تركيز منخفض جداً	0.0 – 1.25E-3	18045.71	4.14	313744.74	71.94
المجموع		436392.40	100	436107.80	100

المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على خريطة (٤).

شكل (٩) النسبة المئوية لتركيز ثاني أكسيد الكبريت (SO_2) في العراق لعام ٢٠٢٤



المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على جدول(٦).

يظهر جدول (٧) وشكل (١٠) تبايناً في نسبة مساحة ثاني أكسيد الكبريت (SO_2) بين فصلي الشتاء والصيف على مستوى محافظات العراق نتيجة لاختلاف العوامل المناخية والجغرافية والأنشطة البشرية، في المحافظات الشمالية التي تضم نينوى وأربيل والسليمانية ودهوك وكركوك وصلاح الدين، يلاحظ أن نسبة التلوث تكون منخفضة إلى منخفضة جداً في الشتاء، حيث تصل نسبة المساحات ذات التلوث المنخفض في نينوى (٩٦,٧٨%)، أربيل (٧١,٧٠%)، السليمانية (٧٩,٢٠%)، ودهوك (٥٠,٢٦%)، ويرجع ذلك إلى تأثير العوامل المناخية مثل الرياح القوية ودرجات الحرارة المنخفضة وهطول الأمطار التي تساعد في تشتيت الملوثات، بينما في الصيف ترتفع نسبة التلوث في بعض المحافظات مثل دهوك التي تسجل نسبة تلوث متوسط (٧٠,٢٤%)، وأربيل (٤٥,٠٤%)، وذلك بسبب ارتفاع درجات الحرارة وانخفاض الأمطار،

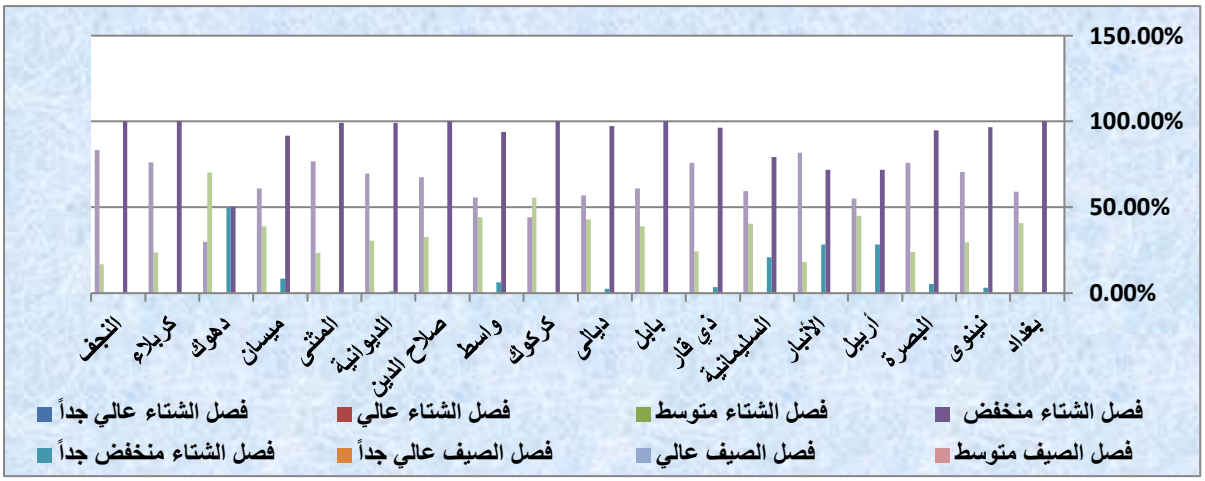
مما يؤدي إلى استقرار الملوثات في الهواء لفترة أطول. أما المحافظات الوسطى التي تضم بغداد والأنبار وديالى وبابل وكربلاء وواسط، فتظهر بيانات الشتاء أن التلوث منخفض إلى منخفض جداً، حيث تصل نسبة المساحات ذات التلوث المنخفض في بغداد (١٠٠,٠٠%)، بابل (١٠٠,٠٠%)، وكربلاء (١٠٠,٠٠%)، ويرجع ذلك إلى تأثير الرياح وزيادة معدلات التهوية الطبيعية، لكن في الصيف يلاحظ ارتفاع التلوث في بعض المناطق مثل بغداد التي تصل فيها نسبة التلوث المتوسط (٤٠,٨٥%)، وديالى (٤٢,٩٤%)، وواسط (٤٤,١٩%)، بسبب الانبعاثات الناتجة عن الأنشطة الصناعية واستخدام المركبات بكثافة مع قلة التهوية. في المحافظات الجنوبية التي تضم البصرة وذي قار والديوانية والمثنى والنجف وميسان، تكون نسب التلوث منخفضة إلى منخفضة جداً خلال الشتاء، حيث تسجل البصرة (٩٤,٧٩%)، ذي قار (٩٦,٤١%)، والمثنى (٩٩,١٩%)، حيث تساعد الظروف الجوية على الحد من تراكم الملوثات، إلا أنه مع دخول فصل الصيف ترتفع نسبة التلوث بشكل واضح، كما هو الحال في النجف التي تصل فيها نسبة التلوث المتوسط إلى (١٦,٧٥%) والتلوث العالي جداً إلى (٨٣,٢٥%)، وذي قار حيث تصل نسبة التلوث المتوسط إلى (٢٤,٢٥%) والتلوث العالي جداً إلى (٧٥,٧٥%)، نتيجة لزيادة درجات الحرارة وضعف حركة الرياح مما يؤدي إلى احتباس الملوثات في الجو لفترات أطول، إلى جانب تأثير الأنشطة الصناعية والنقل على ارتفاع مستويات التلوث خلال الأشهر الحارة.

جدول (٧) النسبة المئوية لمساحة ثاني أكسيد الكبريت (SO_2) على مستوى محافظات العراق لعام ٢٠٢٤

المحافظات	فصل الشتاء					فصل الصيف				
	عالي جداً	عالي	متوسط	منخفض	منخفض جداً	عالي جداً	عالي	متوسط	منخفض	منخفض جداً
بغداد	-	-	-	100.00%	0.00%	-	-	-	40.85%	59.15%
نينوى	-	-	-	96.78%	3.22%	-	-	-	29.54%	70.46%
البصرة	-	-	-	94.79%	5.21%	-	-	-	24.02%	75.98%
أربيل	-	-	-	71.70%	28.30%	-	-	-	45.04%	54.96%
الأنبار	-	-	-	71.70%	28.30%	-	-	-	18.08%	81.92%
السليمانية	-	-	-	79.20%	20.80%	-	-	-	40.59%	59.41%
ذي قار	-	-	-	96.41%	3.59%	-	-	-	24.25%	75.75%
بابل	-	-	-	100.00%	0.00%	-	-	-	39.05%	60.95%
ديالى	-	-	-	97.33%	2.67%	-	-	-	42.94%	57.06%
كركوك	-	-	-	100.00%	0.00%	-	-	-	55.70%	44.30%
واسط	-	-	-	93.79%	6.21%	-	-	-	44.19%	55.81%
صلاح الدين	-	-	-	100.00%	0.00%	-	-	-	32.61%	67.39%
الديوانية	-	-	-	99.12%	0.88%	-	-	-	30.44%	69.56%
المثنى	-	-	-	99.19%	0.81%	-	-	-	23.33%	76.67%
ميسان	-	-	-	91.58%	8.42%	-	-	-	39.00%	61.00%
دهوك	-	-	-	50.26%	49.74%	-	-	-	70.24%	29.76%
كربلاء	-	-	-	100.00%	0.00%	-	-	-	23.75%	76.25%
النجف	-	-	-	100.00%	0.00%	-	-	-	16.75%	83.25%

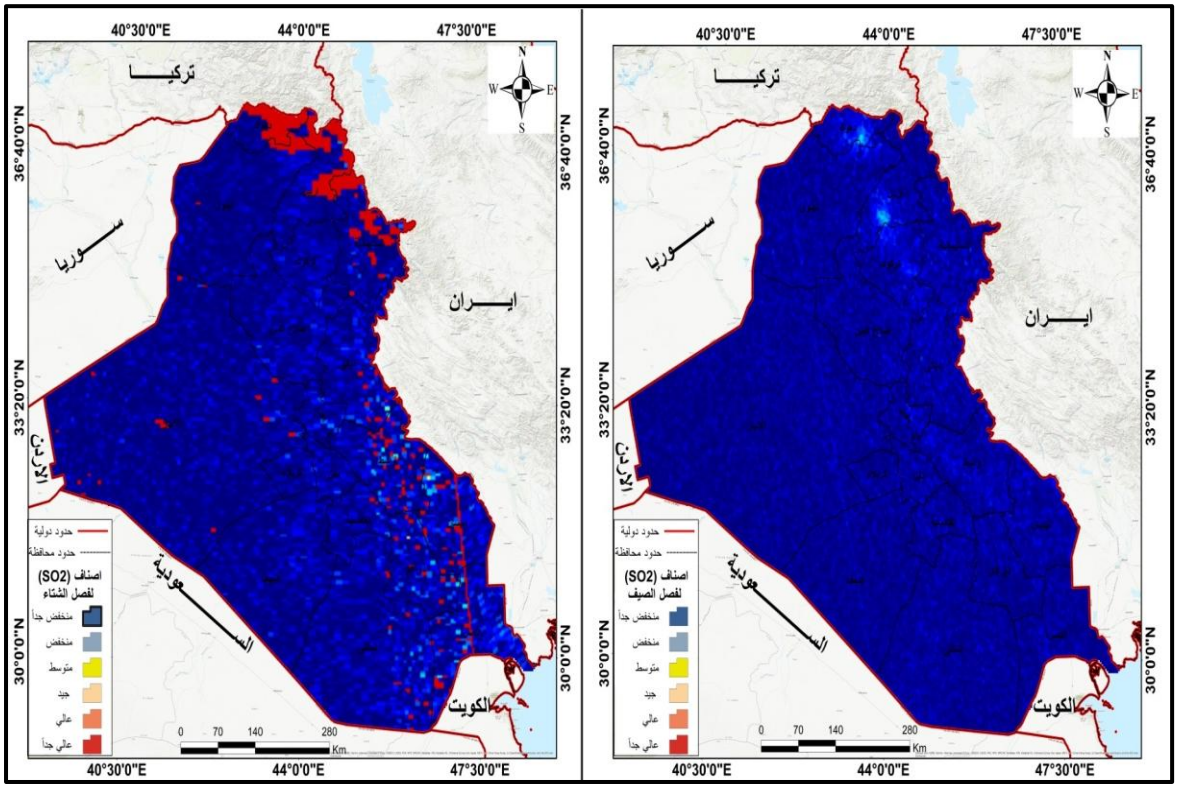
المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على خريطة (٤).

شكل (١٠) النسبية المئوية لمساحة ثاني أكسيد الكبريت (SO_2) على مستوى محافظات العراق لعام ٢٠٢٤



المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على جدول(٧).

خريطة (٤) التوزيع المكاني لغاز (SO_2) خلال فصلي الصيف والشتاء في العراق لعام ٢٠٢٤



المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على بيانات القمر الصناعي (Sentinel-5P).

٢-٤ الميثان (CH_4 :Methane):

يعد غاز الميثان من الغازات الدفيئة القوية التي تساهم بشكل كبير في ظاهرة الاحتباس الحراري. فهو يمتلك قدرة على حبس الحرارة تفوق تلك التي يمتلكها ثاني أكسيد الكربون بـ٨٦ مرة لكل وحدة كتلة خلال فترة ٢٠ عاماً. في العراق، يُعتبر قطاع النفط والغاز المصدر الرئيسي لانبعاثات الميثان، حيث تم رصد معدلات انبعاث مرتفعة للميثان في يونيو ٢٠٢٤ في عدة مناطق، حيث وصلت الانبعاثات إلى ١٨١ و١٩٧ طناً من الميثان في الساعة.

إضافةً إلى المصادر الطبيعية مثل المناطق الرطبة والمستنقعات التي تنبعث منها غازات نتيجة لتحلل المواد العضوية في بيئات فقيرة بالأوكسجين، تساهم الأنشطة البشرية في زيادة انبعاثات الميثان. تشمل هذه الأنشطة الزراعة، خصوصاً زراعة الأرز، وتربية الماشية التي تُنتج كميات كبيرة من الميثان نتيجة لعملية هضم الطعام في أمعائها، وكذلك مكبات النفايات.

بيئياً، يُسهم الميثان في تلوث الهواء، مما يشكل تهديداً على جودة الهواء وصحة النظام البيئي. فعندما يتفاعل الميثان مع ملوثات أخرى في الغلاف الجوي، يتسبب في تكوين الأوزون على مستوى الأرض، الذي يُعد من الملوثات الضارة، ويُسهم أيضاً في تدهور طبقة الأوزون في الغلاف الجوي العلوي.

من الناحية الصحية، يمكن أن يسبب غاز الميثان الدوخة، والغثيان، والصداع، وفقدان الوعي، وذلك بسبب قدرته على استبدال الأوكسجين في الهواء. ورغم أنه غير سام بشكل مباشر، إلا أن تسربه قد يترافق مع ملوثات أخرى تُؤثر سلباً على الصحة (Akpasi، Akpan، Amune، و Olaseinde، ٢٠٢٤).

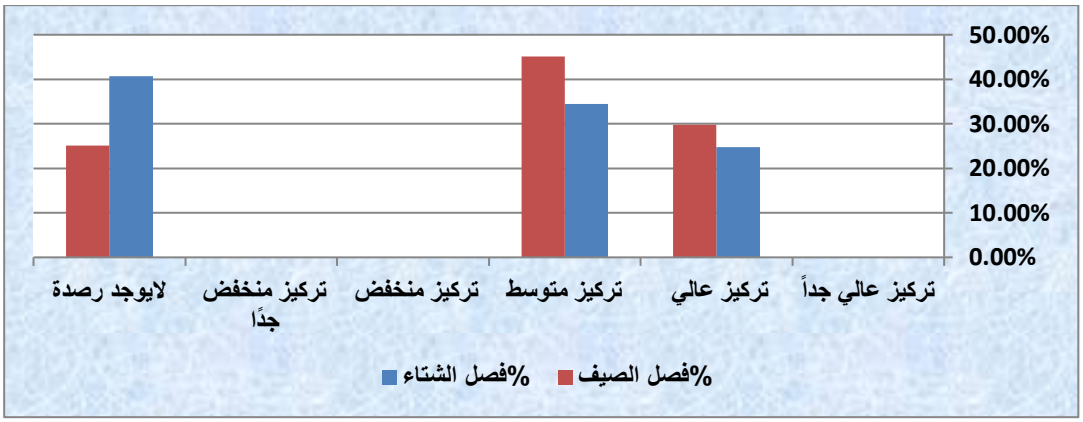
يتبين من الجدول (٨) والشكل (١١) أن تركيز غاز الميثان في العراق يتباين بشكل واضح بين فصلي الشتاء والصيف، ولا توجد بيانات متاحة للفئات ذات التركيز العالي جداً أو العالي أو المتوسط، مما قد يشير إلى ندرة أو عدم وجود مناطق تحتوي على تركيزات مرتفعة من الميثان. أما بالنسبة للفئة ذات التركيز المنخفض، فهي تشغل مساحة كبيرة في فصل الشتاء، حيث تغطي(٤١٨,٣٤٦,٧٠)كم²، أي ما يعادل (٩٥,٨٦%) من إجمالي المساحة المشمولة في الدراسة، بينما تنخفض هذه المساحة بشكل كبير في فصل الصيف لتصل إلى (١٢٢,٣٦٣,٠٦)كم²، ما يعادل (٢٨,٠٦%)، على العكس من ذلك، فإن الفئة ذات التركيز المنخفض جداً تشغل نسبة صغيرة في فصل الشتاء، حيث تغطي (١٨,٠٤٥,٧١)كم² أي (٤,١٤%)، لكنها تزداد بشكل كبير في فصل الصيف، لتصل إلى (٣١٣,٧٤٤,٧٤)كم² ما يمثل (٧١,٩٤%) من إجمالي المساحة. يشير هذا التباين إلى انخفاض عام في تركيز غاز الميثان في الغلاف الجوي في العراق خلال فصل الصيف مقارنة بفصل الشتاء وهو ما قد يكون مرتبطاً بظروف الطقس والتفاعلات الكيميائية التي تؤثر على وجود الميثان في الغلاف الجوي، ففي فصل الشتاء يؤدي استقرار الغلاف الجوي وانخفاض درجات الحرارة، وضعف الأشعة فوق البنفسجية إلى احتباس الميثان وانخفاض معدل تفككه، مما يؤدي إلى ارتفاع تركيزه. كما تساهم الانبعاثات الناتجة عن حرق الوقود الأحفوري للتدفئة في زيادة مستوياته. وفي فصل الصيف تؤدي الحرارة المرتفعة وزيادة الأشعة فوق البنفسجية إلى تعزيز التحلل الضوئي للميثان، بالإضافة إلى ارتفاع تركيز جذور الهيدروكسيل ($OH\cdot$)، التي تسرّع من تفاعله وتفككه. كذلك تسهم الرياح القوية والتيارات الهوائية في تشتيت الميثان وتقليل تركيزه في الهواء.

شكل (٨) مساحة والنسبة المئوية لتركيز الميثان (CH_4) في العراق لعام ٢٠٢٤

الصنف	تركيز _ (mol/m²)	فصل الشتاء/ كم²	%	فصل الصيف/ كم²	%
تركيز عالي جداً	8.75E-3 – 1E-2	-	-	-	-
تركيز عالي	6.25E-3 – 8.75E-3	-	-	-	-
تركيز متوسط	3.75E-3 – 6.25E-3	-	-	-	-
تركيز منخفض	1.25E-3 – 3.75E-3	418346.70	95.86	122363.06	28.06
تركيز منخفض جداً	0.0 – 1.25E-3	18045.71	4.14	313744.74	71.94
المجموع		436392.40	100	436107.80	100

المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على (٥).

شكل (١١) النسبة المئوية لتركيز الميثان (CH_4) في العراق لعام ٢٠٢٤



المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على جدول(٥).

يشير جدول (٩) وشكل (١٢) هناك تفاوتاً واضحاً في تركيز الميثان(CH_4) بين فصلي الشتاء والصيف على مستوى محافظات العراق لعام ٢٠٢٤، ففي المحافظات الشمالية مثل السليمانية وأربيل ودهوك ونينوى، يلاحظ أن تركيز الميثان في فصل الشتاء يكون أقل مقارنة بالصيف. على سبيل المثال، في السليمانية كانت النسبة في الشتاء (٣٨,٤٣%) "عالي"، بينما ارتفعت بشكل ملحوظ في الصيف إلى (٩٧,١١%) "عالي جداً"، وهو ما يعود إلى زيادة الأنشطة الصناعية وحركة النقل في الصيف. في أربيل كانت النسبة في الشتاء (٨٦,٣٨%) "متوسط"، بينما في الصيف انخفضت إلى (٩١,٠٥%) "متوسط". نينوى شهدت في الشتاء تبايناً بين (٣٤,٥٣%) "عالي" و(٦٥,٤٧%) "متوسط"، بينما في الصيف كانت النسب (٦١,٩٨%) "عالي" و(٣٨,٠٢%) "متوسط". في دهوك، كانت النسب في الشتاء (٢٤,٥٥%) "متوسط"، وفي الصيف ارتفعت إلى (٤٥,٢٢%) "متوسط". يرجع هذا التباين إلى تأثيرات المناخ، حيث يحد انخفاض درجات الحرارة في الشتاء من تلوث الميثان، بينما تساهم الأنشطة الاقتصادية والصناعية في زيادته في الصيف.

في المحافظات الوسطى مثل بغداد، الأنبار، بابل، ديالى، كربلاء، النجف وواسط، ارتفعت نسب الميثان في الصيف مقارنة بالشتاء. في بغداد، كانت النسبة في الشتاء (٨٥,٩٥%) "متوسط"، بينما ارتفعت في الصيف إلى (٩٤,٥٢%) "عالي جداً". في الأنبار كانت النسب في الشتاء (٧٤,٦٨%) "متوسط"، بينما ارتفعت في الصيف إلى (٤٣,١٤%) "عالي" و(٥٦,٨٦%) "متوسط". بابل أظهرت تبايناً طفيفاً في الشتاء بنسبة (٧٩,٣٧%) "متوسط"، بينما ارتفعت في الصيف إلى (٩٤,٦٧%) "عالي جداً". ديالى شهدت (٥٧,٥٩%) "عالي" و(٤٢,٤١%) "متوسط" في الشتاء، بينما كانت النسب في الصيف أقرب للتوازن بين (٤٩,٩٥%) "عالي" و(٥٠,٠٥%) "متوسط". في كربلاء كانت النسب في الشتاء (٥٧,٨٢%) "عالي" و(٤٢,١٨%) "متوسط"، بينما كانت في الصيف مشابهة. النجف كانت النسب في الشتاء (٤٧,٣٠%) "عالي" و(٥٢,٧٠%) "متوسط"، بينما ارتفعت في الصيف إلى (١٣,١٤%) "عالي" و(٨٦,٨٦%) "متوسط". أما واسط فقد كانت النسب في الشتاء (٩٧,٢٢%) "متوسط"، بينما في الصيف انخفضت لتكون أقرب للتوازن بين (٣٧,١٢%) "عالي" و(٦٢,٨٨%) "متوسط". الزيادة في الصيف تعود إلى النشاطات الحضرية والصناعية المتزايدة مثل حركة النقل واستخدام الآلات في المدن.

أما في المحافظات الجنوبية مثل البصرة، ذي قار، المثنى، ميسان والديوانية، كانت نسب الميثان مرتفعة في الشتاء مقارنة بالصيف. في البصرة كانت النسب في الشتاء (٧٨,٧٤%) "عالي" و(٢١,٢٦%) "متوسط"، بينما في الصيف

انخفضت إلى (٦٠,٧٣%) "عالي" و(٣٩,٢٧%) "متوسط". ذي قار كانت النسب في الشتاء (٧٨,٦٨%) "متوسط"، وفي الصيف تراوحت بين (٦٣,٧٥%) "متوسط" و(٣٦,٢٥%) "عالي". المثنى أظهرت (٦٧,٣٢%) "عالي" و(٣٢,٦٨%) "متوسط" في الشتاء، بينما في الصيف كانت النسب (٣٧,٠٧%) "عالي" و(٦٢,٩٣%) "متوسط". في ميسان كانت النسبة في الشتاء (١٠٠%) "عالي جداً"، بينما في الصيف انخفضت إلى (٤٩,٤٨%) "عالي" و(٥٠,٥٢%) "متوسط". أما الديوانية فقد كانت النسب في الشتاء (٧٥,٧١%) "متوسط"، بينما في الصيف كانت (٧٧,٩٣%) "متوسط" و(٢٢,٠٧%) "عالي". السبب في هذا التباين يعود إلى الأنشطة الصناعية الكبيرة في هذه المناطق مثل المصافي النفطية والمنشآت البتروكيماوية في البصرة، التي تساهم في زيادة التلوث طوال العام.

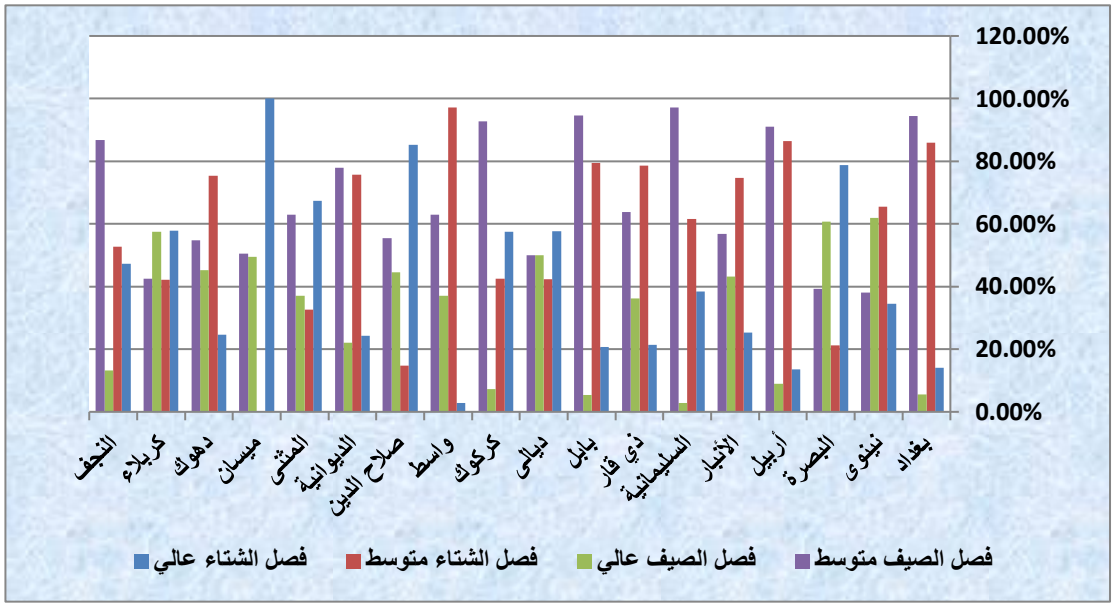
وأن السبب الرئيسي للتباين في تركيز الميثان بين فصلي الشتاء والصيف يعود إلى تأثيرات المناخ حيث يكون التلوث أقل في الشتاء بسبب انخفاض درجات الحرارة التي تحد من انتشار الملوثات، بينما يزداد في الصيف نتيجة الأنشطة الصناعية والنقل. في الصيف، تؤدي درجات الحرارة المرتفعة إلى زيادة حركة المركبات والنشاط الصناعي، مما يزيد من تركيز الميثان في الهواء.

جدول (٩) النسبة المئوية لمساحة الميثان (CH_4) على مستوى محافظات العراق لعام ٢٠٢٤

المحافظات	فصل الشتاء					فصل الصيف				
	عالي جداً	عالي	متوسط	منخفض	منخفض جداً	عالي جداً	عالي	متوسط	منخفض	منخفض جداً
بغداد	0	14.05%	85.95%	0	0	0	5.48%	94.52%	0	0
نينوى	0	34.53%	65.47%	0	0	0	61.98%	38.02%	0	0
البصرة	0	78.74%	21.26%	0	0	0	60.73%	39.27%	0	0
أربيل	0	13.62%	86.38%	0	0	0	8.95%	91.05%	0	0
الأنبار	0	25.32%	74.68%	0	0	0	43.14%	56.86%	0	0
السليمانية	0	38.43%	61.57%	0	0	0	2.89%	97.11%	0	0
ذي قار	0	21.32%	78.68%	0	0	0	36.25%	63.75%	0	0
بابل	0	20.63%	79.37%	0	0	0	5.33%	94.67%	0	0
ديالى	0	57.59%	42.41%	0	0	0	49.95%	50.05%	0	0
كركوك	0	57.47%	42.53%	0	0	0	7.21%	92.79%	0	0
واسط	0	2.78%	97.22%	0	0	0	37.12%	62.88%	0	0
صلاح الدين	0	85.29%	14.71%	0	0	0	44.54%	55.46%	0	0
الديوانية	0	24.29%	75.71%	0	0	0	22.07%	77.93%	0	0
المثنى	0	67.32%	32.68%	0	0	0	37.07%	62.93%	0	0
ميسان	0	100.00%	0.00%	0	0	0	49.48%	50.52%	0	0
دهوك	0	24.55%	75.45%	0	0	0	45.22%	54.78%	0	0
كربلاء	0	57.82%	42.18%	0	0	0	57.52%	42.48%	0	0
النجف	0	47.30%	52.70%	0	0	0	13.14%	86.86%	0	0

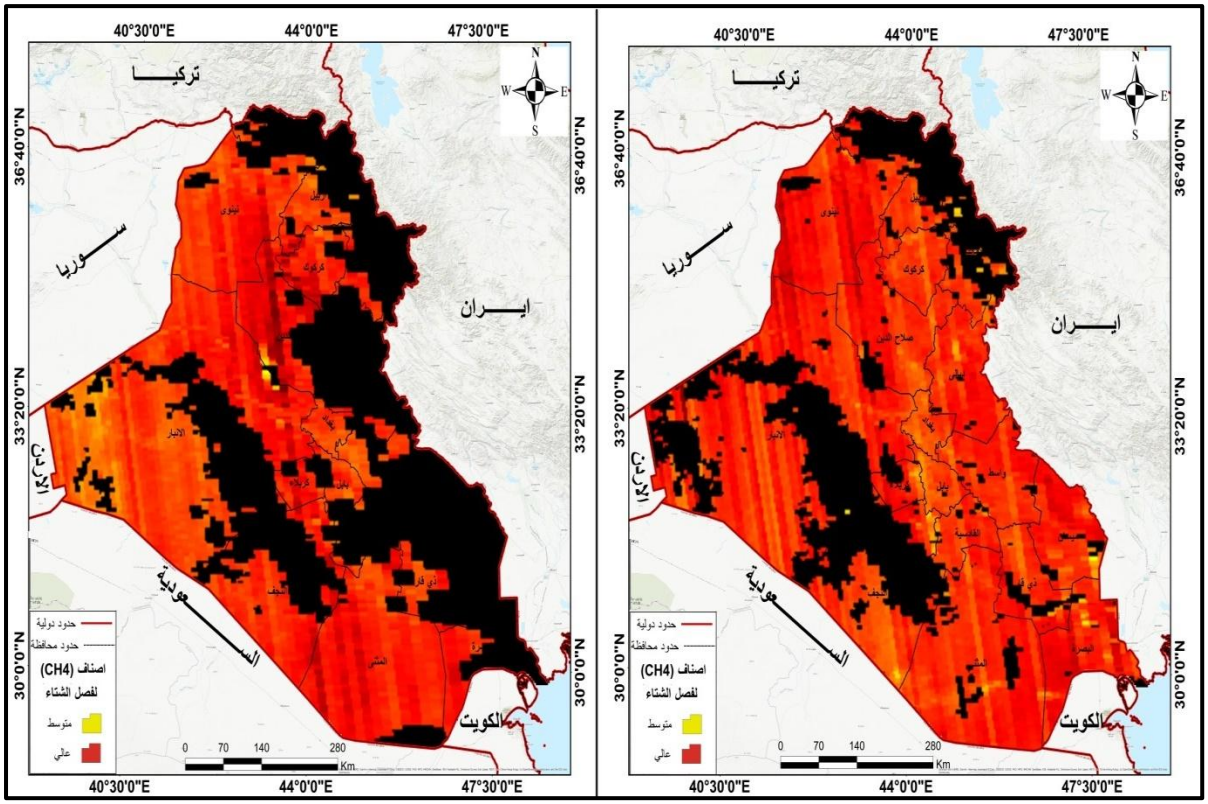
المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على خريطة (٥).

شكل (١٢) النسبة المئوية لتركيز الميثان (CH_4) في العراق لعام ٢٠٢٤



المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على جدول(٩).

خريطة (٥) التوزيع المكاني لغاز الميثان (CH_4) خلال فصلي الصيف والشتاء في العراق لعام ٢٠٢٤



المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على بيانات القمر الصناعي (Sentinel-5P).

الاستنتاجات:

١- يتيح التكامل بين تقنيات الذكاء الاصطناعي ونظم المعلومات الجغرافية رصد غازات الاحتباس الحراري بدقة وفعالية. حيث يقوم الذكاء الاصطناعي بمعالجة البيانات البيئية بسرعة، بينما توفر نظم المعلومات الجغرافية أدوات لتصور البيانات وتحديد المناطق الأكثر تأثراً، مما يعزز التحليل واتخاذ القرارات المناسبة للتخفيف من تأثيرات الغازات الملوثة.

٢- ثاني أكسيد النيتروجين (NO_2): يزداد تركيزه في الشتاء نتيجة الأنشطة البشرية والرياح الضعيفة، بينما يرتفع في الصيف بسبب زيادة الأنشطة الصناعية والزراعية وتأثير العواصف الرملية.

٣- أول أكسيد الكربون (CO): في الشتاء، يتركز ضمن الفئة المنخفضة بنسبة ٧٩,٥٢%، بينما يرتفع تركيزه في الصيف ضمن الفئة العالية بنسبة ٥,٦٧% بسبب الأنشطة البشرية وارتفاع درجات الحرارة.

٤- ثاني أكسيد الكبريت (SO_2): يهيمن التركيز المنخفض في الشتاء بنسبة ٩٥,٨٦%، لكنه ينخفض في الصيف إلى ٢٨,٠٦%، مع ارتفاع التركيز المنخفض جداً إلى ٧١,٩٤% بسبب قلة الأمطار وارتفاع الحرارة.

٥- الميثان (CH_4): ينخفض تركيزه في الصيف مقارنة بالشتاء بسبب تأثيرات الطقس، حيث يؤدي استقرار الغلاف الجوي في الشتاء إلى احتباسه، بينما تسهم درجات الحرارة المرتفعة والأشعة فوق البنفسجية في الصيف في تفككه وتشتيته.

التوصيات:

١- ينبغي تطوير البنية التحتية التكنولوجية في العراق لدعم استخدام الذكاء الاصطناعي ونظم المعلومات الجغرافية (GIS) في تحليل بيانات مستشعر TROPOMI-5P، بما في ذلك توفير أجهزة حاسوبية قوية وبرمجيات متخصصة.

٢- يجب تدريب الكوادر العراقية في مجالات الذكاء الاصطناعي ونظم المعلومات الجغرافية لتمكينهم من تحليل بيانات غازات الاحتباس الحراري بكفاءة، وذلك من خلال ورش عمل ودورات تدريبية متخصصة.

٣- تطوير قاعدة بيانات وطنية شاملة تجمع بيانات TROPOMI-5P مع بيانات محلية أخرى لرصد غازات الاحتباس الحراري، مما يسهم في تحليل أكثر دقة وفعالية.

٤- التعاون مع المنظمات الدولية والجامعات العالمية لتبادل الخبرات والحصول على الدعم الفني في مجال استخدام الذكاء الاصطناعي ونظم المعلومات الجغرافية لرصد التغيرات المناخية.

٥- وضع سياسات واستراتيجيات وطنية تعتمد على نتائج تحليل البيانات لمواجهة تحديات الاحتباس الحراري، بما في ذلك تقليل الانبعاثات وتعزيز الاستدامة البيئية.

٦- تنظيم حملات توعية لتثقيف المجتمع حول أهمية رصد غازات الاحتباس الحراري ودور الذكاء الاصطناعي ونظم المعلومات الجغرافية في حماية البيئة.

المصادر

Aghil Madadi ،Atefeh Hoseini Sadr و،Abbas Kashani. (09 September, 2020). Monitoring of aerosols and studying its effects on the environment and humans health in Iran. Environmental Geochemistry and Health (43.٣٣١–٣١٧) .

Ana Ćirišan ،Zorica Podraščanin ،Ljiljana Nikolić Bujanović ،Sanja Mrazovac Kurilić و ، Predrag Ilić. (07 March, 2023). Trend Analysis Application on Near Surface SO2 Concentration Data from 2010 to 2020 in Serbia. Water, Air, & Soil Pollution.

Bijay Halder ،Iman Ahmadianfar ،Salim Heddam ،Zainab Haider Mussa ،Leonardo Goliatt ،Mou Leong Tan .(٢٠٢٣) ،Machine learning-based country-level annual air pollutants exploration using Sentinel-5P and Google Earth Engine. scientific reports.

Daniel O. Omokpariola ،John N. Nduka و،Patrick L. Omokpariola . (03 April, 2024). Short-term trends of air quality and pollutant concentrations in Nigeria from 2018–2022 using tropospheric sentinel-5P and 3A/B satellite data. Discover Applied Sciences.

Edwards,T. R و ، .Davis, J. P. . (2023). Carbon Monoxide in Urban Environments: Sources, Levels, and Health Implications. Journal: Atmospheric Environment.

Faisal M, Prakoso KA, Sanjaya H et al. (2021). Spatio-temporal analysis of air pollutants changes during the COVID-19 using sentinel-5P in google earth engine (Case Study: Java Island). IEEE Asia-Pacific Conference on Geoscience. Electronics, and Remote Sensing Technology (AGERS . (102–108).

Graaf, K. de et al. (2020). Sentinel-5 Precursor: A new tool for atmospheric monitoring. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology.

Jian Zeng ،Bruce E. Vollmer ،Jennifer Wei ،Dana M. Ostrenga و،James E. Johnson. (November, 2018). Sentinel-5P/TROPOMI and S-NPP/OMPS Data Support at GES DISC. Atmos.

Magro C, Nunes L, Gonçalves O et al. (2021). Atmospheric Trends of CO and CH4 from Extreme Wildfires in Portugal Using Sentinel-5P TROPOMI Level-2 Data. Fire 4:25.

Schneising O ،Buchwitz M و،Reuter M. (2019). A scientific algorithm to simultaneously retrieve carbon monoxide and methane from TROPOMI onboard Sentinel-5 Precursor. Atmos Meas Tech.

Stephen Okiemute Akpasi ،Joseph Samuel Akpan ،Ubani Oluwaseun Amune و،Ayodeji Arnold Olaseinde. (1 May , 2024). Methane Advances: Trends and Summary from Selected Studies. MDPI.

V. G. D. Verbeek. (2024). Health Effects of Nitrogen Dioxide (NO_2). Environmental International.

Vahid Safarianzengir ،Behrouz Sobhani ،Mohammad Hasan Yazdani و ، Mohammadkia Kianian . (15 May, 2020). Monitoring, analysis and spatial and temporal zoning of air pollution (carbon monoxide) using Sentinel-5 satellite data for health management in Iran, located in the Middle East. Air Quality, Atmosphere & Health.

Veefkind a,g ،Aben b, K و،McMullan c. (21 February , 2012). TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications. Remote Sensing of Environment.