

رصد ومراقبة تلوث الهواء بغاز ثاني أكسيد النيتروجين (NO₂) في محافظة كربلاء المقدسة

لعام ٢٠٢٣ باستخدام بيانات القمر الاصطناعي Sentinel-5

م.م. زينب جبر عواد

جامعة المستنصرية ، كلية التربية ، قسم الجغرافية

Monitoring and Observing Air Pollution by Nitrogen Dioxide (NO₂) in
Karbala Governorate for the Year 2023 Using Sentinel-5 Satellite Data

M.Sc. Zeinab Jabr Awad

Al-Mustansiriyah University, College of Education, Department of
Geography

zynbjbr2@uomustansiriyah.edu.iq

المستخلص:

تهدف الدراسة إلى رصد وتقييم مستويات تلوث الهواء بغاز ثاني أكسيد النيتروجين (NO₂) في محافظة كربلاء المقدسة للعام ٢٠٢٣، بالاعتماد على تقنيات الاستشعار عن بعد ومعالجة المرئيات الفضائية. تم استخدام بيانات القمر الاصطناعي Sentinel-5P التابع لوكالة الفضاء الأوروبية (ESA)، والذي يوفر قياسات دقيقة لتركيز الغازات الملوثة في الغلاف الجوي من خلال المستشعر TROPOMI. تمت معالجة وتحليل البيانات باستخدام بيئات نظم المعلومات الجغرافية (GIS) بهدف إنتاج خرائط مكانية توضح التوزيع الزمني والمكاني لتركيزات الغاز خلال أشهر السنة. أظهرت النتائج أن أعلى تراكيز وأكبر مساحة لتلوث الهواء بغاز ثاني أكسيد النيتروجين سجلت خلال فصل الشتاء بسبب زيادة انبعاثات المولدات ووسائل التدفئة واستقرار الكتلة الهوائية. وانخفضت التراكيز في فصل الصيف نتيجة ارتفاع درجات الحرارة وزيادة التهوية الجوية، بينما كانت تراكيز فصلي الربيع والخريف متوسطة بسبب الاعتدال المناخي وتذبذب الأنشطة البشرية. يوصى بالاعتماد على بيانات القمر الصناعي Sentinel-5P بشكل دوري لرصد التغيرات المكانية والزمانية في تراكيز غاز ثاني أكسيد النيتروجين (NO₂) وربطها بقاعدة بيانات جغرافية (GIS) لتسهيل التحليل واتخاذ القرارات البيئية الدقيقة. كما يوصى بدمج البيانات الفضائية مع البيانات الأرضية من خلال مقارنة قياسات Sentinel-5P بقراءات محطات الرصد الأرضية للتحقق من دقة النتائج وتحسين نماذج التوزيع المكاني وتحديد النقاط الساخنة للتلوث بدقة أعلى. إضافة إلى ذلك، يُستحسن توظيف تقنيات التعلم الآلي للتنبؤ بمستويات NO₂ المستقبلية اعتماداً على البيانات التاريخية والعوامل المناخية والأنشطة البشرية، بما يتيح وضع استراتيجيات استباقية للحد من تلوث الهواء في محافظة كربلاء.

الكلمات المفتاحية: تلوث الهواء، ثاني أكسيد النيتروجين (NO₂)، (Sentinel-5P)، الاستشعار عن بعد، GIS، كربلاء المقدسة.

Abstract

The study aims to monitor and assess air pollution levels of nitrogen dioxide (NO₂) in Karbala Governorate for the year 2023, based on remote sensing techniques and satellite image processing. Data from the European Space Agency's (ESA) Sentinel-5P satellite were used, which provides accurate measurements of atmospheric pollutant concentrations through the TROPOMI sensor. The data were processed and analyzed within a Geographic Information Systems (GIS) environment to produce spatial maps illustrating the temporal and spatial distribution of NO₂ concentrations throughout the year. The results revealed that the highest concentrations and largest spatial coverage of NO₂ pollution were recorded during **winter**, due to increased emissions from generators and heating sources as well as the stability of air masses. In contrast, concentrations decreased in **summer** as a result of higher temperatures and increased atmospheric ventilation, while **spring** and **autumn** recorded moderate concentrations due to mild weather conditions and fluctuating human and climatic activities.

It is recommended to rely on Sentinel-5P satellite data periodically to monitor spatiotemporal changes in NO₂ concentrations and integrate them into a GIS database to facilitate analysis and support precise environmental decision-making. Furthermore, integrating satellite data with ground-based measurements by comparing Sentinel-5P readings with those from air monitoring stations is advised to verify accuracy, enhance spatial distribution models, and accurately identify pollution hotspots. In addition, the use of **machine learning techniques** is encouraged to predict future NO₂ levels based on historical data, climatic factors, and human activities, allowing for proactive strategies to reduce air pollution in Karbala Governorate.

Keywords: Air pollution, Nitrogen dioxide (NO₂), Sentinel-5P, Remote sensing, GIS, Karbala Governorate.

المقدمة:

تعد مشكلة تلوث الهواء من أبرز التحديات البيئية التي تواجه العالم في العصر الحديث، إذ أصبحت مصدر قلقٍ عالمي نتيجة لتأثيراتها السلبية المباشرة على صحة الإنسان واستدامة النظم البيئية وتوازن المناخ. وتزداد خطورة هذا النوع من التلوث في المناطق الحضرية ذات الكثافة السكانية العالية والنشاط الصناعي والتجاري الكثيف، حيث تتزايد انبعاثات الغازات الملوثة الناتجة عن احتراق الوقود في وسائل النقل والمولدات الكهربائية والمصانع. ويعد غاز ثاني أكسيد النيتروجين (NO₂) أحد المكونات الأساسية لتلوث الهواء الحضري، لما له من آثار ضارة على الجهاز التنفسي للإنسان ودوره في تكوين الضباب الدخاني والأمطار الحمضية، فضلاً عن إسهامه في إضعاف الغطاء النباتي والإضرار بالبنية التحتية الحضرية. تكتسب محافظة كربلاء المقدسة أهمية خاصة لدراسة ملوثات الهواء، نظراً لما تشهده من توسع عمراني سريع وزيادة ملحوظة في أعداد السكان والزائرين سنوياً، إلى جانب النمو في الأنشطة التجارية والصناعية، وكلها عوامل تؤدي إلى ارتفاع معدلات انبعاث الغازات الملوثة، ولا سيما غاز ثاني أكسيد النيتروجين. كما أن الطبيعة المناخية للمحافظة، التي تتسم بمناخ شبه جاف ودرجات حرارة مرتفعة في فصل الصيف، تسهم في زيادة تراكم الملوثات الجوية وانخفاض معدلات تشتتها. وبالتالي، فإن رصد وتقييم تركيزات NO₂ في أجواء كربلاء يعد خطوة ضرورية لفهم الوضع البيئي الراهن ووضع الأسس العلمية لإدارة جودة الهواء. تأتي هذه الدراسة لتسلط الضوء على رصد ومراقبة تلوث الهواء بغاز ثاني أكسيد النيتروجين (NO₂) في محافظة كربلاء المقدسة لعام ٢٠٢٣، من خلال الاعتماد على بيانات القمر الاصطناعي Sentinel-5P التابع لوكالة الفضاء الأوروبية (ESA)، والمزود بالمستشعر المتطور (TROPOMI (TROPospheric Monitoring Instrument)، الذي يتميز بقدرته العالية على قياس مكونات الغلاف الجوي بدقة زمنية ومكانية كبيرة، مما يجعله أداة فعالة لمتابعة تغيرات الغازات الملوثة على المستويين المحلي والإقليمي. وتستند الدراسة إلى منهجية متكاملة تعتمد على تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية (GIS) لتحليل البيانات المكانية والزمانية الخاصة بتركيزات غاز NO₂، وإعداد خرائط رقمية توضح توزيع التلوث خلال فصول السنة المختلفة لعام ٢٠٢٣. كما تهدف إلى تحديد المناطق الأكثر تعرضاً للتلوث وربطها بالأنشطة البشرية السائدة، مثل حركة المرور، الكثافة السكانية، والمناطق الصناعية، إضافةً إلى تحليل التباينات الفصلية التي تعكس تأثير العوامل المناخية كدرجة الحرارة وسرعة الرياح واتجاهها.

مشكلة الدراسة:

تتمثل مشكلة الدراسة في تزايد تلوث الهواء في محافظة كربلاء المقدسة نتيجة للنمو السكاني والأنشطة العمرانية والمرورية والصناعية المتصاعدة، مما أدى إلى ارتفاع تركيز غاز ثاني أكسيد النيتروجين (NO₂) الذي يعد من أخطر ملوثات الهواء ذات التأثير المباشر على صحة الإنسان والبيئة. ويلاحظ نقص في الدراسات المحلية التي ترصد هذا الغاز مكانياً وزمانياً بسبب محدودية محطات الرصد الأرضية، مما يستدعي استخدام تقنيات الاستشعار عن بعد وبيانات القمر الاصطناعي Sentinel-5P لرصد تلوث الهواء بدقة.

فرضية الدراسة:

تطلق الدراسة من فرضية مفادها أن تراكيز غاز ثاني أكسيد النيتروجين (NO₂) في محافظة كربلاء المقدسة تشهد تبايناً مكانياً وزمانياً واضحاً خلال عام ٢٠٢٣، يتأثر بكثافة الأنشطة البشرية في المناطق الحضرية والصناعية وبالعوامل المناخية التي تحدد تراكم الملوثات أو تشتتها. كما يتوقع أن تكون المناطق الحضرية ذات الكثافة السكانية العالية والازدحام المروري الأكثر تلوثاً، بينما تنخفض التراكيز في المناطق الريفية، مع تزايد مستويات الغاز في الشتاء وانخفاضها في الصيف. وتؤكد الدراسة إمكانية استخدام بيانات القمر الاصطناعي Sentinel-5P كوسيلة فعالة لرصد تلوث الهواء ودعم جهود الإدارة البيئية في المحافظة.

أهداف الدراسة:

تهدف هذه الدراسة إلى تحقيق مجموعة من الأهداف الرئيسية التي تسهم في فهم وتقييم تلوث الهواء في محافظة كربلاء المقدسة وهي:

- ١- رصد وتحليل التوزيع المكاني والزمني لغاز ثاني أكسيد النيتروجين (NO_2) في أجواء محافظة كربلاء المقدسة خلال عام ٢٠٢٣ باستخدام بيانات القمر الاصطناعي Sentinel-5P.
- ٢- تحديد المناطق الأكثر تعرضاً لتلوث الهوائي وربطها بالأنشطة البشرية كالكثافة السكانية، حركة المرور، والمناطق الصناعية.
- ٣- تحليل التغيرات الفصلية لتركيزات الغاز ودراسة تأثير العوامل المناخية (مثل درجة الحرارة، الرياح، والرطوبة) على مستويات التلوث.
- ٤- توظيف تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية (GIS) في إنتاج خرائط رقمية دقيقة توضح مستويات تلوث الهواء في المحافظة.
- ٥- توفير قاعدة بيانات بيئية مكانية حديثة تدعم الجهات المختصة في وضع الخطط والاستراتيجيات الرامية إلى الحد من تلوث الهواء وتحسين نوعية البيئة في كربلاء المقدسة.

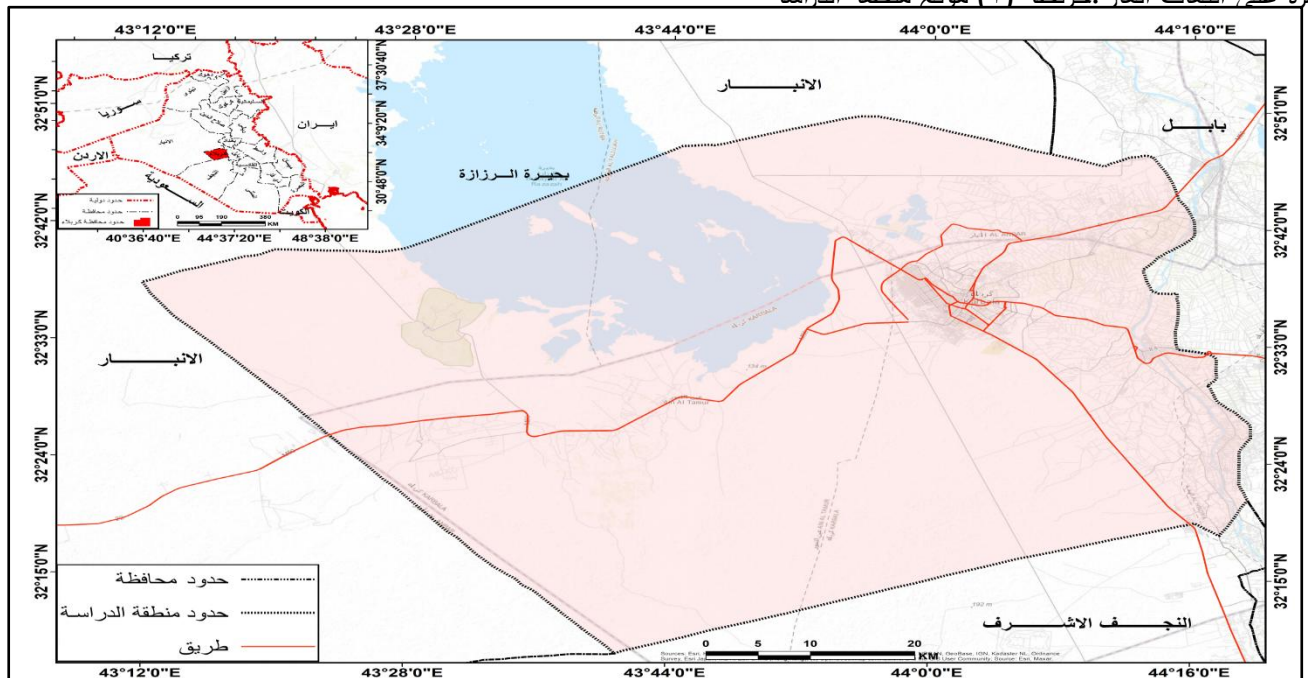
مناهج الدراسة:

اعتمدت هذه الدراسة على مجموعة من المناهج الجغرافية المتكاملة التي أسهمت في تحقيق أهدافها بدقة وشمولية. فقد تم استخدام المنهج التحليلي المكاني لتحليل التوزيع الجغرافي لتركيزات غاز ثاني أكسيد النيتروجين (NO_2) في محافظة كربلاء المقدسة من خلال معالجة بيانات القمر الاصطناعي Sentinel-5P باستخدام تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية (GIS)، بهدف تحديد الأنماط المكانية للمناطق الأكثر تلوثاً وربطها بالأنشطة البشرية المختلفة. كما اعتمدت الدراسة المنهج الزمني لدراسة التغيرات الفصلية في تراكيز الغاز خلال عام ٢٠٢٣، للكشف عن تأثير العوامل المناخية مثل درجة الحرارة وسرعة الرياح والرطوبة في تباين مستويات التلوث عبر فصول السنة. أما المنهج الكمي فقد استخدم لتحليل البيانات الرقمية المستخرجة من صور الأقمار الاصطناعية، وحساب المؤشرات الإحصائية كالمتوسطات والانحرافات المعيارية وبناء الجداول والرسوم البيانية التي توضح العلاقات بين المتغيرات البيئية والبشرية.

موقع منطقة الدراسة:

تقع محافظة كربلاء في الجزء الأوسط من العراق ضمن إقليم الفرات الأوسط، وتعد من المحافظات ذات الأهمية الدينية والاقتصادية البارزة. تمتد المحافظة بين دائرتي عرض (٣٢°٥١'٠" - ٣٢°١٥'٠") شمالاً وخطي طول (٤٤°١٦'٠" - ٤٣°١٢'٠") شرقاً، يحدها من الشمال محافظة الأنبار، ومن الشرق محافظة بابل، ومن الجنوب الشرقي محافظة النجف الأشرف، في حين تمتد من الجنوب الغربي نحو بادية كربلاء التي تمثل الانتقال إلى الصحراء الغربية العراقية. تبلغ مساحتها نحو (٥٠٣٤ كم²). تضم المحافظة ثلاثة أضية رئيسية هي (قضاء المركز الذي يشمل مدينة كربلاء، وقضاء عين التمر الواقع إلى الغرب ويمتد نحو مناطق البادية، وقضاء الهندية (طويريج) إلى الشرق بمحاذاة نهر الفرات). أما الحدود الزمانية للدراسة فقد تمثلت في عام ٢٠٢٣، مع التركيز على فصلي الشتاء والصيف لما لهما من أهمية في زيادة تركيز غاز ثاني أكسيد النيتروجين (NO_2). وتكتسب محافظة كربلاء المقدسة أهمية مكانية وزمانية، حيث يشهد هذان الفصلان زيادة في الأنشطة البشرية والاقتصادية التي تؤثر

مباشرة على انبعاثات الغاز. خريطة (١) موقع منطقة الدراسة



المصدر: من عمل الباحثة على وزارة الري، الهيئة العامة للمساحة، خارطة العراق الادارية، ١:١٠٠٠٠٠٠، ومخرجات برنامج ARCGIS. مواد وطرق العمل:

١- غاز ثاني اكسيد النتروجين (NO_2) وتأثيراته: يعد غاز ثاني أكسيد النيتروجين (NO_2) أحد الملوثات الجوية الرئيسية التي تتبعث بشكل أساسي من احتراق الوقود في المركبات والمصانع والمولدات الكهربائية، ويعتبر مؤشراً مهماً لتلوث الهواء، خاصة في المناطق الحضرية ذات الكثافة السكانية العالية مثل محافظة كربلاء. تتعدد مصادر انبعاث هذا الغاز في المحافظة، أبرزها حركة المرور الكثيفة في المدينة، لا سيما خلال المواسم الدنيبة التي تشهد تزايد أعداد الزائرين، بالإضافة إلى المنشآت الصناعية مثل مصانع الأسمدة والمبيدات، والتي يمكن أن تسهم في إطلاق كميات من NO_2 إلى الجو. تأثيرات تجارية، فضلاً عن الأنشطة الزراعية التي تشمل استخدام الأسمدة والمبيدات، والتي يمكن أن تسهم في إطلاق كميات من NO_2 إلى الجو. تأثيرات غاز ثاني أكسيد النيتروجين على الإنسان خطيرة، حيث يمتد تأثيره بشكل رئيسي إلى الجهاز التنفسي، فيتسبب في تفاقم أمراض الربو وزيادة احتمالية الإصابة بالتهابات الجهاز التنفسي، كما يؤدي إلى تدهور وظائف الرئة وزيادة حالات دخول المستشفيات بسبب الأمراض التنفسية. وقد أشارت الدراسات إلى أن التعرض المستمر لهذا الغاز يمكن أن يزيد من معدلات الوفيات المرتبطة بأمراض الجهاز التنفسي ويفاقم الحالات المزمنة، مما يجعله تهديداً صحياً كبيراً للسكان. أما على الصعيد البيئي، فإن NO_2 يسهم في تدهور البيئة من خلال تكوين الأمطار الحمضية نتيجة تفاعله مع الماء والأكسجين لتكوين حمض النيتريك، وهو ما يؤدي إلى أضرار في التربة والمياه والنباتات. كما يساهم الغاز في تكوين الضباب الدخاني الذي يقلل من وضوح الرؤية، ويؤثر سلباً على نمو النباتات والمحاصيل الزراعية، مما ينعكس على الإنتاج الزراعي والاقتصاد المحلي. تعاني محافظة كربلاء من ارتفاع ملحوظ في مستويات تلوث الهواء بغاز ثاني أكسيد النيتروجين (NO_2)، ولا سيما خلال المواسم الدنيبة التي تشهد ازدحاماً مرورياً كثيفاً نتيجة توافد أعداد كبيرة من الزائرين. وتزداد حدة التلوث بفعل الانبعاثات الناتجة عن المركبات والمصانع والمولدات الكهربائية المنتشرة في المدينة، مما يجعل من الضروري اتخاذ إجراءات عاجلة للحد من هذه الانبعاثات وحماية الصحة العامة. ومن أبرز التوصيات المقترحة للحد من تأثيرات هذا الغاز، تطوير منظومة النقل العام لتقليل الاعتماد على المركبات الخاصة، وتشجيع استخدام مصادر الطاقة النظيفة في المنازل والمنشآت الصناعية، فضلاً عن تعزيز الوعي البيئي بين السكان حول أخطار غاز NO_2 وطرق الحد من انتشاره. كما يعد تطبيق سياسات بيئية صارمة وإجراءات رقابية فعالة خطوة أساسية نحو تحسين جودة الهواء في المحافظة، والحفاظ على صحة الإنسان وسلامة البيئة.

٢- منصات الاستشعار عن بعد المستخدمة في رصد غاز (NO_2)

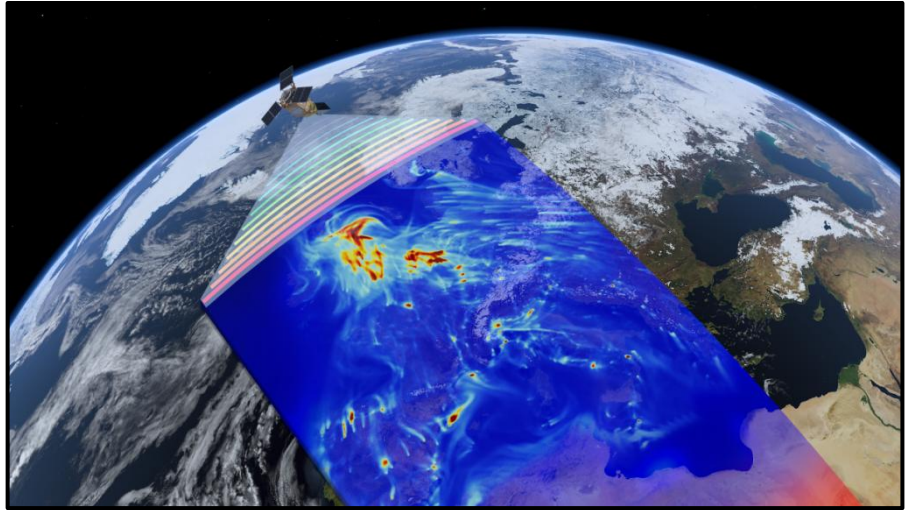
١-٢ القمر الصناعي (Sentinel-5P):

يعد القمر الصناعي (Sentinel-5 Precursor) أحد الأقمار التابعة لبرنامج Copernicus التابع لوكالة الفضاء الأوروبية (ESA)، والمخصص لرصد ومراقبة مكونات الغلاف الجوي على مستوى الكرة الأرضية. أطلق القمر في ١٣ تشرين الأول/أكتوبر عام ٢٠١٧ بهدف سد الفجوة بين القمر الصناعي (Envisat) والأقمار اللاحقة من سلسلة (Sentinel-5) (Keppens, et al, 2024). يتميز (Sentinel-5P) بقدرته العالية على قياس تراكيز غازات الاحتباس الحراري مثل ثاني أكسيد النيتروجين (NO_2)، والأوزون (O_3)، وأول أكسيد الكربون (CO)، والميثان (CH_4)، وثاني أكسيد الكبريت (SO_2)، والهباء الجوي (Aerosols)، إضافةً إلى العديد من الملوثات الجوية الأخرى. ويعد هذا القمر من أهم أدوات الرصد البيئي المعاصرة، إذ يوفر بيانات يومية وعالمية ذات دقة مكانية وطيفية مرتفعة، ما يجعله أداة أساسية في مراقبة جودة الهواء وتغير المناخ (Douros, al et, 2023). يدور (Sentinel-5P) في مدار قطبي شمسي متزامن على ارتفاع يقارب ٨٢٤ كم، مما يتيح له تغطية الكرة الأرضية بالكامل كل يوم. وترسل البيانات التي يجمعها إلى محطات أرضية متخصصة لتحليلها باستخدام خوارزميات متقدمة تتيح إنتاج خرائط زمنية ومكانية دقيقة لمستويات الغازات الملوثة في الغلاف الجوي (Judd, et al, 2020). يمثل القمر الاصطناعي نقلة نوعية في مجال الاستشعار عن بعد للغلاف الجوي، إذ يوفر بيانات مفتوحة ومجانية تستخدم في التطبيقات البيئية، والصحية، والبحثية، فضلاً عن دعم الجهود الدولية في مكافحة تلوث الهواء والتغير المناخي.

٢-٢ مستشعر (TROPOMI) ودوره في مراقبة غاز ثاني اكسيد النتروجين (NO_2):

يعد مستشعر TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument) الأداة الرئيسية المحمولة على متن القمر الصناعي Sentinel-5 Precursor (Sentinel-5P)، وهو من إنتاج مشترك بين الوكالة الأوروبية للفضاء (ESA) والمعهد الهولندي لبحوث الفضاء (SRON) بالتعاون مع الوكالة الهولندية للفضاء (NSO). شكل (١) صمم هذا المستشعر بهدف رصد مكونات الغلاف الجوي ذات التأثير المباشر على جودة

الهواء والمناخ وصحة الإنسان، وذلك من خلال قياس الإشعاع الشمسي المنعكس والمبعثر من الغلاف الجوي وسطح الأرض عبر نطاق واسع من الأطوال الموجية (Veefkind, J. P., et al, 2012). شكل (١) القمر الاصطناعي Sentinel-5P



<https://terrascop.be/fr/satellites/sentinel-5p>

٢-١ الخصائص التقنية للمستشعر:

يعد مستشعر (TROPOspheric Monitoring Instrument: TROPOMI) من أكثر أجهزة الرصد الطيفي تطوراً ضمن منظومة أقمار كوبرنيكوس (Copernicus) الأوروبية، إذ يتميز بقدرته على النقاط بيانات عالية الدقة مكانياً وزمانياً عبر نطاق واسع من الأطوال الموجية يمتد من الأشعة فوق البنفسجية (UV) إلى الأشعة تحت الحمراء القصيرة (SWIR). ويصمم المستشعر وفق تقنية المطياف التصويري الخفي-الخطي (Push-broom Imaging Spectrometer)، التي تتيح تسجيل مشهد طيفي مستمر عبر مسار القمر فوق سطح الأرض، مما يمكنه من تغطية الكرة الأرضية يومياً بدقة عالية (ESA, 2024).

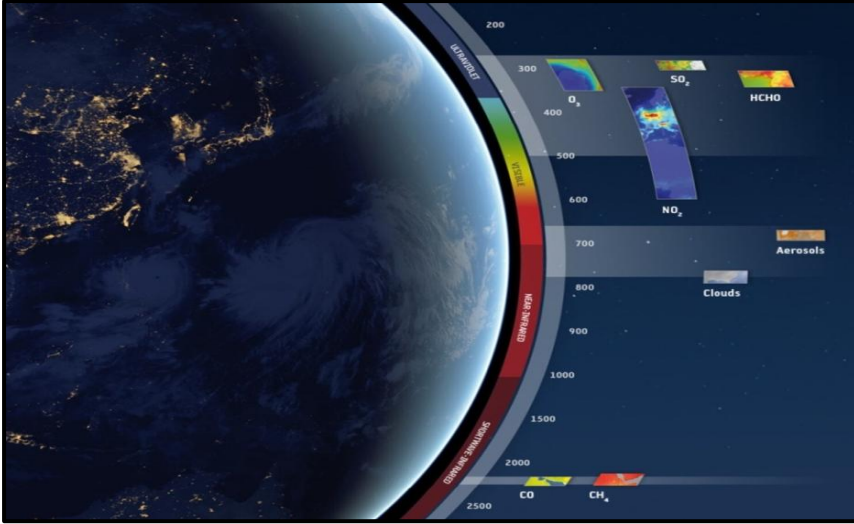
١-٢-١ التكوين البصري والطيفي للمستشعر:

يحتوي المستشعر على نظام بصري مكون من مرآة رئيسية ومشتت طيفي (Diffraction Grating) يقوم بتحليل الإشعاع الشمسي المنعكس والمبعثر من الغلاف الجوي وسطح الأرض إلى نطاقاته الطيفية الدقيقة. يتم استقبال الإشعاع عبر مصفوفات كاشفات متعددة الأطياف (2D Detectors) تعمل في أربعة نطاقات رئيسية (ESA, 2024). جدول (١) الانطقة الطيفية لمستشعر TROPOMI

أهم الغازات المرصودة	الدقة الطيفية (نانومتر)	الطول الموجي (نانومتر)	نطاق الطيفي
الأوزون (O ₃)، ثاني أكسيد الكبريت (SO ₂)، أول أكسيد النيتروجين	~0.45	270 – 500	UV1-UV
ثاني أكسيد النيتروجين (NO ₂)، بخار الماء (H ₂ O)	~0.45	500 – 700	V
بخار الماء (H ₂ O)، الأيروسولات	~0.45	675 – 775	NI
الميثان (CH ₄)، أول أكسيد الكربون (CO)	~0.25	2305 – 2385	SWI

٢-٢-١ الدقة المكانية والزمانية

تبلغ الدقة المكانية الاسمية للمستشعر حوالي (7 × 3.5) كيلومترات عند نقطة الناظم (Nadir)، وهي أعلى دقة طيفية مكانية متاحة حالياً لرصد الغلاف الجوي من الفضاء، بالمقارنة مع القمر الصناعي السابق (OMI) الذي بلغت دقته (13 × 24) كم. أما الدقة الزمانية فتبلغ 24 ساعة لتغطية الكرة الأرضية كاملة، إذ يغطي المستشعر شريطاً عرضياً (Swath Width) يبلغ حوالي (2600) كيلومتر في كل دورة مدارية (KNMI, 2023). شكل (٢).



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

٣-٢-١ المعايرة والتصحيح الإشعاعي:

تتم معايرة المستشعر بانتظام لضمان دقة القياسات الطيفية، ويشمل ذلك:

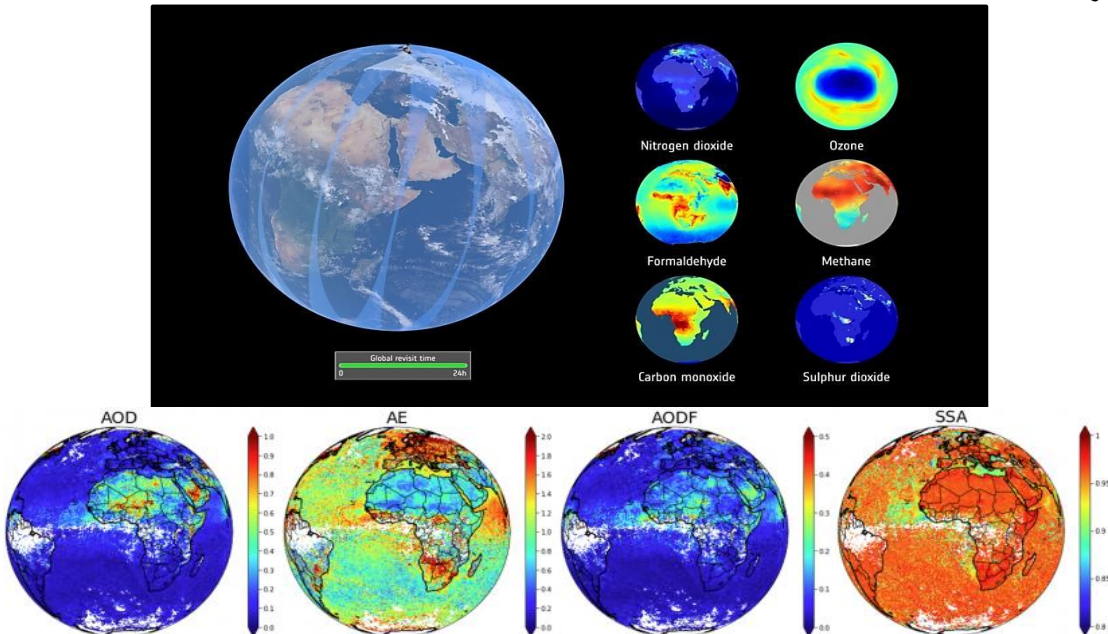
- المعايرة الميدانية (In-flight Calibration) باستخدام مشاهد سماوية مرجعية كضوء الشمس المنعكس من لوحات مرجعية داخلية.
- التصحيح الإشعاعي: Radiometric Correction لضبط التباين الطيفي وإزالة الانحرافات الناتجة عن الكاشفات أو درجة الحرارة.
- المعايرة المكانية (Geolocation Correction) لتحديد موقع كل بكسل بدقة عبر دمج معلومات المدار واتجاه الرؤية (Palmer, P. I., et al, 2021).

٤-٢-١ مستوى البيانات (Data Levels) :

ينتج المستشعر بيانات على ثلاثة مستويات رئيسية:

- المستوى (١) (B:١) بيانات إشعاعية خام معايرة طيفياً وزمانياً.
- المستوى (٢) منتجات مشتقة لغازات محددة (O_3 ، CO ، CH_4 ، SO_2 ، NO_2) تشمل الأعمدة الكلية والتروبوسفيرية.
- المستوى (٣) بيانات مجمعة زمنياً ومكانياً (gridded) لتكوين خرائط شهرية أو موسمية. شكل (٣).

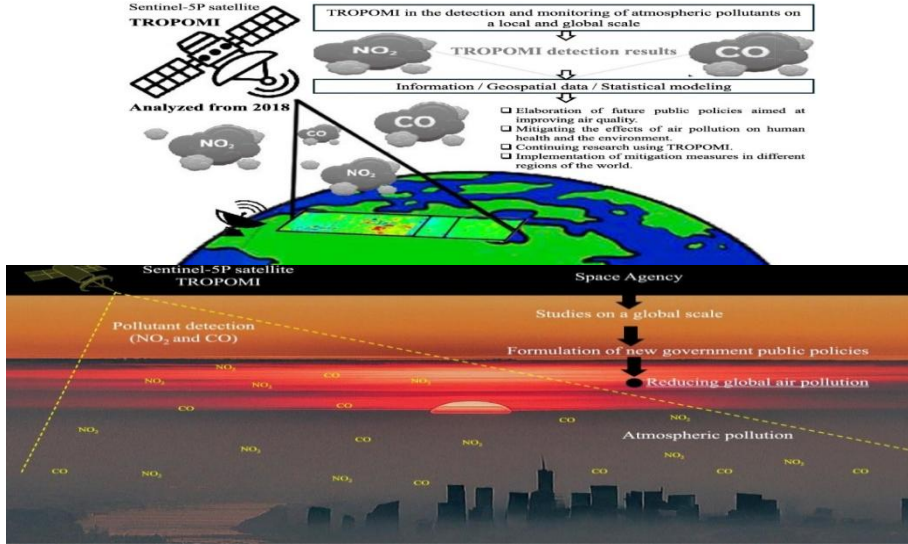
شكل (٣) منتجات المستشعر TROPOMI



<https://e04society.esa.int/2022/04/26/new-aerosol-and-surface-properties-estimation-from-sentinel-5p-tropomi>

- يعمل المستشعر على متن القمر الصناعي Sentinel-5P ضمن مدار شمسي متزامن (Sun-synchronous orbit) بارتفاع يقارب (824) كيلومتراً وزاوية ميل (٩٨.٧).
- يتم إرسال البيانات إلى مراكز الاستقبال الأرضية الأوروبية فور مرور القمر فوقها، لتعالج بواسطة نظام المعالجة المركزي (PDGS - Segment) Payload Data Ground التابع لوكالة الفضاء الأوروبية. شكل (٤).
- تتاح البيانات مجاناً من خلال منصة (Copernicus Open Access Hub) بصيغ NetCDF قابلة للمعالجة باستخدام البرامج العلمية مثل Python و Google Earth Engine و matlab (Lange, K., et al, 2023).

شكل (٤) آلية عمل خوارزمية TROPOMI- 5P



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

١-٣ عمل المستشعر (TROPOMI):

- يستند مبدأ عمل مستشعر TROPOMI إلى التحليل الطيفي للإشعاع الشمسي المنتشر والمبعثر من الغلاف الجوي و سطح الأرض، وذلك لاستخلاص تراكيز الغازات والهباءات الجوية التي تؤثر في تركيب الغلاف الجوي وجودة الهواء. يعتمد المستشعر على تقنية التحليل الطيفي التفاضلي للامتصاص (Differential Optical Absorption Spectroscopy - DOAS)، التي تقوم بقياس مقدار الامتصاص المميز لكل غاز عند أطوال موجية معينة، ومن ثم تحويل هذه القياسات إلى تراكيز كمية (عمودية أو إجمالية) (Qu, Z., et al, 2021).
- ١-٣-١ الأساس الفيزيائي للرصد الطيفي:

تعتمد طريقة TROPOMI على المبدأ الفيزيائي القائل بأن كل غاز في الغلاف الجوي يمتلك بصمة امتصاص طيفية مميزة ضمن نطاقات محددة من الطول الموجي، فعند مرور الإشعاع الشمسي عبر الغلاف الجوي، يقوم كل غاز بامتصاص جزء من هذا الإشعاع عند أطوال موجية خاصة به. يقوم المستشعر بتسجيل الطيف المنعكس أو المبعثر (Backscattered Solar Radiation)، ثم يقارن الطيف المرصود مع طيف مرجعي خالٍ من الامتصاص لتحديد كمية الامتصاص لكل غاز، وهو ما يعرف بالتحليل الطيفي التفاضلي (Li, S., et al, 2023).

١-٣-٢ مراحل معالجة الإشارة وتحويلها إلى بيانات علمية:

تمر عملية الرصد والتحليل في TROPOMI بعدة مراحل مترابطة تبدأ من استقبال الإشارة الطيفية وتنتهي بمنتجات علمية جاهزة للاستخدام، وتشمل:

- قياس الإشعاع الطيفي: (Spectral Radiance Measurement): يقوم المستشعر بتسجيل شدة الإشعاع الشمسي المنعكس من سطح الأرض أو المبعثر من طبقات الغلاف الجوي عبر نطاقات طيفية تمتد من ٢٧٠ إلى ٢٣٨٥ نانومتر، وذلك باستخدام كواشف ضوئية عالية الحساسية.
- استخراج العمود المائل (Slant Column Density - SCD): يحسب مقدار الامتصاص الكلي على طول مسار الشعاع من خلال خوارزميات DOAS، لتقدير ما يعرف بالعمود المائل، أي كمية الغاز في المسار الشعاعي الممتد من الشمس إلى الكاشف مروراً بالغلاف الجوي (Meixin Li, 2022).

- تصحيح المكونات الستراتوسفيرية والتروبوسفيرية: نظراً لأن بعض الغازات (مثل NO_2) توجد في كل من الطبقتين الستراتوسفيرية والتروبوسفيرية، يتم استخدام نماذج عددية متقدمة مثل (Data Assimilation Models) مثل (TM5-MP) لفصل مساهمة كل طبقة.
 - تحويل العمود المائل إلى العمود العمودي: (Vertical Column Density - VCD)
 - بعد تصحيح الطبقات الجوية، يتم استخدام عامل كتلة الهواء (Air Mass Factor - AMF) لتحويل كمية الغاز من المسار المائل إلى المسار العمودي القياسي. يعتمد حساب AMF على معطيات عدة منها زاوية الرؤية، زاوية الشمس، ارتفاع الغيوم، خصائص السطح، توزيع الغاز عمودياً، والهباء الجوي (Kezia Lange, et al, 2023).
 - إنتاج المنتجات النهائية: (Level-2 Products): تحول النتائج إلى خرائط كمية لغازات محددة (مثل NO_2 ، CO ، SO_2 ، CH_4) ضمن منتجات المستوى الثاني، مرفقة بمعامل جودة (Quality Flag) يحدد مدى موثوقية كل بكسل.
- ١-٤ مزايا هذا النظام الطيفي:

- التحسس الطيفي الدقيق: قدرة عالية على التفريق بين الغازات ذات الامتصاص المتقارب بفضل الدقة الطيفية ($0.25-0.45$) نانومتر.
 - تغطية شاملة وسريعة: بفضل عرض المسح الكبير (2600 كم)، يمكن الحصول على تغطية عالمية كل يوم.
 - التكامل مع النماذج العددية: يتم دمج القياسات مع نماذج النقل الجوي لتصحيح عدم اليقين وتحسين تقديرات التركيزات السطحية.
 - إمكانية الكشف السريع للتغيرات البيئية: مثل الانبعاثات المفاجئة من البراكين أو الحرائق الكبرى (ESA, 2024).
- ١-٥ العوامل المؤثرة في دقة القياس:

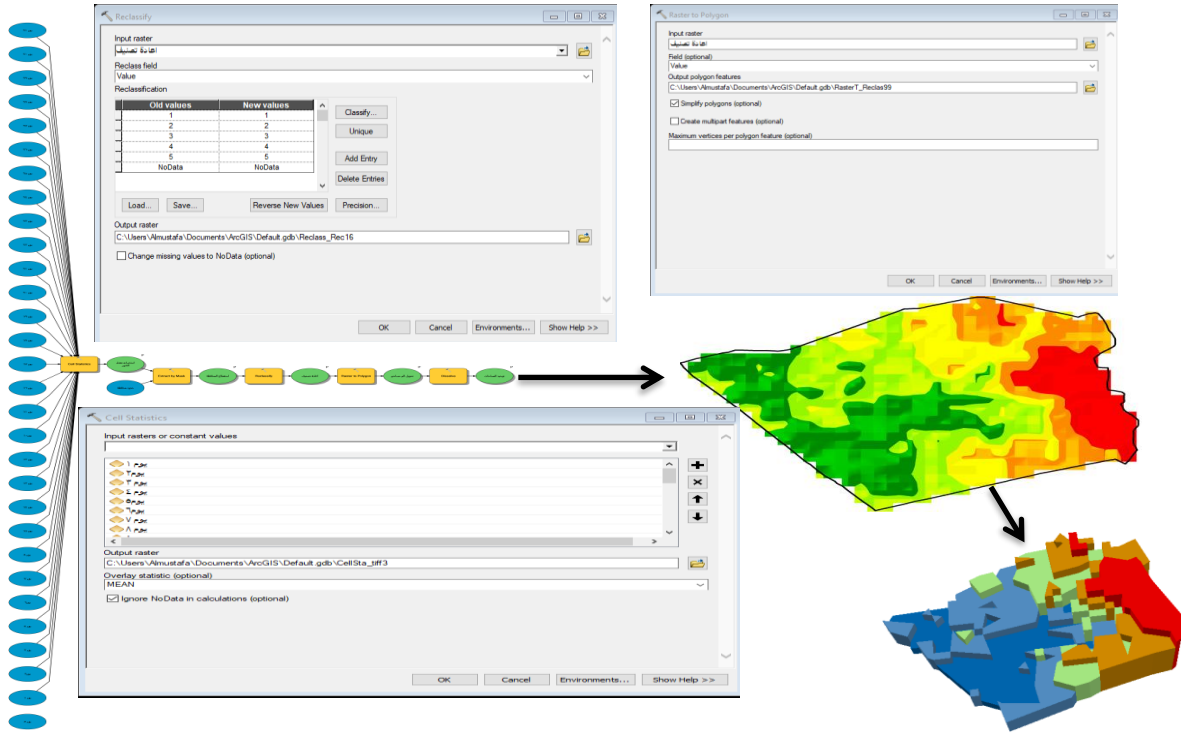
تتأثر دقة القياسات بعدة عوامل، من أهمها:

- وجود الغيوم أو الهباء الجوي الكثيف الذي يضعف الإشارة الطيفية.
 - الانعكاسية السطحية العالية (مثل الثلوج أو الصحارى) التي قد تحدث تشتتاً غير خطي.
 - الأخطاء الجغرافية في تحديد موقع البكسل. (Geolocation Error)
 - دقة البيانات المساعدة (Meteorological Data) الداخلة في حساب.
- ٣- النمذجة الطيفية باستخدام نظم المعلومات الجغرافية (GIS).

تعد النمذجة الطيفية باستخدام نظم المعلومات الجغرافية (GIS) من التقنيات العلمية الحديثة التي تكتسب أهمية كبيرة في تحليل ورصد ملوثات الهواء، وبشكل خاص غاز ثاني أكسيد النيتروجين (NO_2)، لما له من تأثير مباشر في جودة الهواء وصحة الإنسان. وتكمن أهمية هذه النمذجة في قدرتها على دمج البيانات الطيفية المستخرجة من الأقمار الصناعية، مثل القمر الأوروبي Sentinel-5P المزود بالمستشعر TROPOMI، مع إمكانيات التحليل المكاني التي يوفرها نظام المعلومات الجغرافية، وذلك لإنتاج خرائط مكانية دقيقة توضح التوزيع الزمني والمكاني لتركيزات الغاز وتحليل العوامل المؤثرة فيه. تم في هذه الدراسة الاعتماد في تحليل تركيز غاز ثاني أكسيد النيتروجين (NO_2) على فصلي الشتاء والصيف لعام ٢٠٢٣، نظراً لأهميتهما في إبراز التباين الموسمي في مستويات التلوث الجوي. إذ يشمل فصل الشتاء أشهر (كانون الأول، كانون الثاني، وشباط) بواقع (90) رصدة يومية، جمعت من المرئيات الفضائية اليومية للقمر (Sentinel-5P). تم أولاً حساب المتوسطات الشهرية لقيم الغاز باستخدام أداة (Cell Statistics)، ثم جرى حساب المعدل الفصلي من خلال دمج المتوسطات الشهرية لاستخراج التغير العام للتركيز خلال فصل الشتاء. وبالطريقة نفسها، شمل فصل الصيف (حزيران، تموز، وآب) بواقع (92) يوماً، حيث تم اتباع الخطوات ذاتها لاستخراج المعدلات الشهرية ثم حساب المتوسط الفصلي، بهدف المقارنة بين الفصليين وتحديد الاختلافات في تراكيز الغاز تبعاً للعوامل المناخية والنشاط البشري. وقد تم الاعتماد في التحليل الطيفي والمكاني على مجموعة من الأدوات داخل بيئة (ArcGIS)، حيث استخدمت أداة (Reclassify) لإعادة تصنيف القيم الرقمية المستمرة إلى فئات نوعية تمثل مستويات التلوث (منخفض، متوسط، مرتفع) وفقاً للمعايير البيئية المعتمدة من منظمة الصحة العالمية (WHO). كما تم استخدام أداة (Spatial Analyst) لتحديد مناطق التركيز العالي للغاز، وتحليل الأنماط المكانية للتلوث. كذلك، استخدمت أداة (Interpolation (IDW) لتقدير القيم في المناطق التي لا تتوفر فيها بيانات مباشرة، مما مكن من إنشاء خرائط مستمرة توضح امتداد الغاز في جميع أجزاء منطقة الدراسة ولتعزيز التحليل المكاني وربط تراكيز الغاز بالعوامل المسببة له، تم استخدام أداة (Overlay Analysis) لدمج طبقة تراكيز (NO_2) مع طبقات أخرى مثل الكثافة السكانية وشبكات الطرق والمناطق الصناعية، بهدف تحديد العلاقة بين مصادر الانبعاث ومستويات التلوث. كما جرى تطبيق أداة (Zonal Statistics) لحساب المتوسط والانحراف المعياري لتركيز الغاز داخل

الوحدات الإدارية، مما ساعد في تحديد المناطق الأكثر تعرضاً للتلوث. أما فيما يتعلق بتنظيم وتسلسل خطوات التحليل، فقد تم الاعتماد على أداة (Builder Model) لبناء نموذج تحليلي متكامل يجمع مراحل المعالجة الطيفية والمكانية كافة بدءاً من إدخال الصور الفضائية، مروراً بعمليات الحساب والتصنيف، وصولاً إلى إنتاج الخرائط النهائية. كما تم استخدام أداة (Time Slider) لإظهار التغير الزمني في تراكيز الغاز بين فصلي الشتاء والصيف بطريقة ديناميكية، ما أتاح تتبع تطور التلوث وتحديد فترات الذروة والانخفاض. وأخيراً، استخدمت أدوات (Visualization) مثل (Symbology) و (Layout View) لتصميم الخرائط النهائية وتوضيح الفروق المكانية في تراكيز الغاز بشكل علمي دقيق. شكل (٥).

شكل (٥) النمذجة المكانية لغاز ثاني أكسيد النيتروجين NO₂ باستخدام GIS



المصدر: من عمل الباحثة بالاعتماد على أداة (٥)، ومخرجات برنامج ArcGIS.

٤- تحليل التغيرات المكانية والزمانية في مستويات تلوث الهواء بغاز (NO₂) يسهم تحليل التغيرات المكانية والزمانية في مستويات تلوث الهواء بغاز ثاني أكسيد النيتروجين (NO₂) خلال الفصول الأربعة في فهم ديناميكية التلوث وتحديد الفترات الزمنية الأكثر تأثراً، مما يتيح ربط التغيرات الموسمية بالعوامل المناخية والأنشطة البشرية المختلفة. كما يوفر هذا التحليل قاعدة بيانات علمية تدعم الدراسات البيئية والمناخية، وتسهم في تحسين دقة النماذج الجوية. ومن الناحية التطبيقية، يساعد هذا النهج في تحديد المواسم الحرجة لاتخاذ الإجراءات الوقائية المناسبة وتقليل الانبعاثات، فضلاً عن تعزيز جهود التخطيط البيئي المستدام وإدارة جودة الهواء بكفاءة أعلى. وفي ما يلي تحليل تغيرات تركيز غاز ثاني أكسيد النيتروجين (NO₂) في محافظة كربلاء خلال الفصول الأربعة من السنة.

٤-١ تغير تراكيز غاز ثاني أكسيد النيتروجين (NO₂) خلال فصل الشتاء

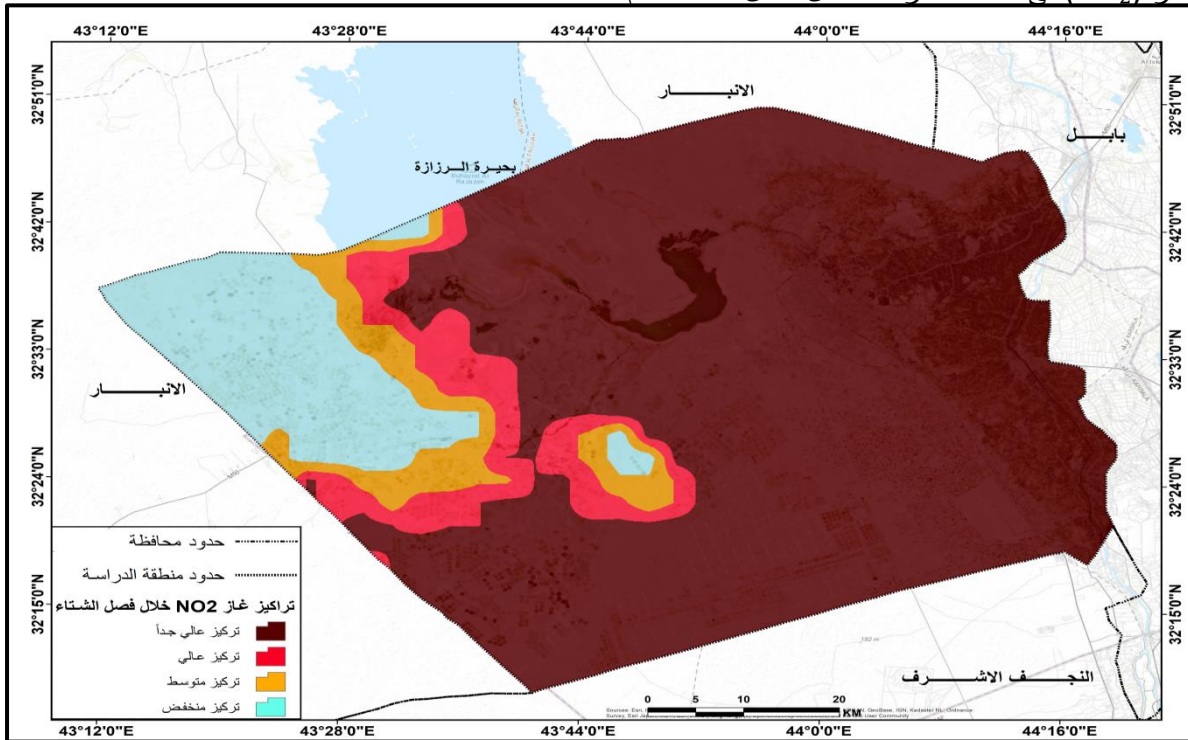
أظهرت نتائج تحليل جدول (٢) أن تراكيز غاز ثاني أكسيد النيتروجين (NO₂) في محافظة كربلاء خلال موسم الشتاء لعام ٢٠٢٣ ارتفاعاً ملحوظاً في مستويات التلوث الهوائي، إذ تبين أن المساحة ذات التركيز العالي جداً من الغاز، والتي تراوحت قيمها بين 1.0×10^{-4} - 8.75×10^{-5} مول/متر مربع (بلغت (3938.22) كم²، أي ما يعادل 78.54% من إجمالي مساحة المحافظة، وهي النسبة الأكبر مقارنة ببقية الأصناف. في حين شكّلت المناطق ذات التركيز العالي 8.75×10^{-5} - 6.25×10^{-5} مول/متر مربع (نسبة 5.08% بمساحة (254.70) كم². أما المناطق ذات التركيز المتوسط 6.25×10^{-5} - 3.75×10^{-5} مول/متر مربع (فقد بلغت 4.55% بمساحة (228.27) كم². في المقابل، اقتصرت المناطق ذات التركيز المنخفض 3.75×10^{-5} - 1.25×10^{-5} مول/متر مربع (على 1.83% بمساحة (593.06) كم²، بينما لم تسجّل أي مساحة ذات تركيز منخفض جداً خلال هذا الموسم يعزى هذا الارتفاع الكبير في تراكيز غاز NO₂ خلال فصل الشتاء إلى عدة عوامل طبيعية وبشرية متداخلة. فمن الناحية المناخية، يعدّ الشتاء موسماً تنسم أجواؤه بانخفاض درجات الحرارة وضعف حركة الرياح وازدياد الاستقرار الجوي، مما يؤدي إلى انخفاض كفاءة التشتت الجوي للملوثات وتراكمها بالقرب من سطح الأرض. كما يساهم الانعكاس الحراري (Thermal Inversion) الذي يتكرر شتاءً في

حجز الملوثات ضمن الطبقات السفلى من الغلاف الجوي. أما من الناحية البشرية، فتعد محافظة كربلاء من المدن التي تشهد كثافة سكانية ونشاطاً عمرانياً وسياحياً مرتفعاً، خاصة خلال الزيارات الدينية التي تزداد في هذا الفصل، مما يؤدي إلى زيادة حركة المركبات وانبعاث كميات كبيرة من الغازات الناتجة عن احتراق الوقود في السيارات والمولدات الأهلية والصناعية. كما يسهم الاعتماد المتزايد على المولدات الكهربائية المنزلية في الشتاء، نتيجة لانقطاع التيار الكهربائي، في رفع معدلات انبعاثات أكاسيد النيتروجين. خريطة (٢). الجدول (٢) مستويات تركيز غاز ثاني أكسيد النيتروجين (NO_2) في فصل الشتاء

الصف	تركيز _ (mol/m^2)	المساحة/ كم ^٢	%
تركيز عالي جداً	8.75E-5 – 1.0E-4	3938.22	78.54
تركيز عالي	6.25E-5 – 8.75E-5	254.70	5.08
تركيز متوسط	3.75E-5 – 6.25E-5	228.27	4.55
تركيز منخفض	1.25E-5 – 3.75E-5	593.06	11.83
تركيز منخفض جداً	0.0 – 1.25E-5	-	-
المجموع		5014.25	100

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

خريطة (٢) تركيز غاز (NO_2) في محافظة كربلاء خلال فصل الشتاء لعام ٢٠٢٣



المصدر: من عمل الباحثة بالاعتماد على بيانات القمر الاصطناعي (Sentinel-5P)، ومخرجات برنامج Arcgis.

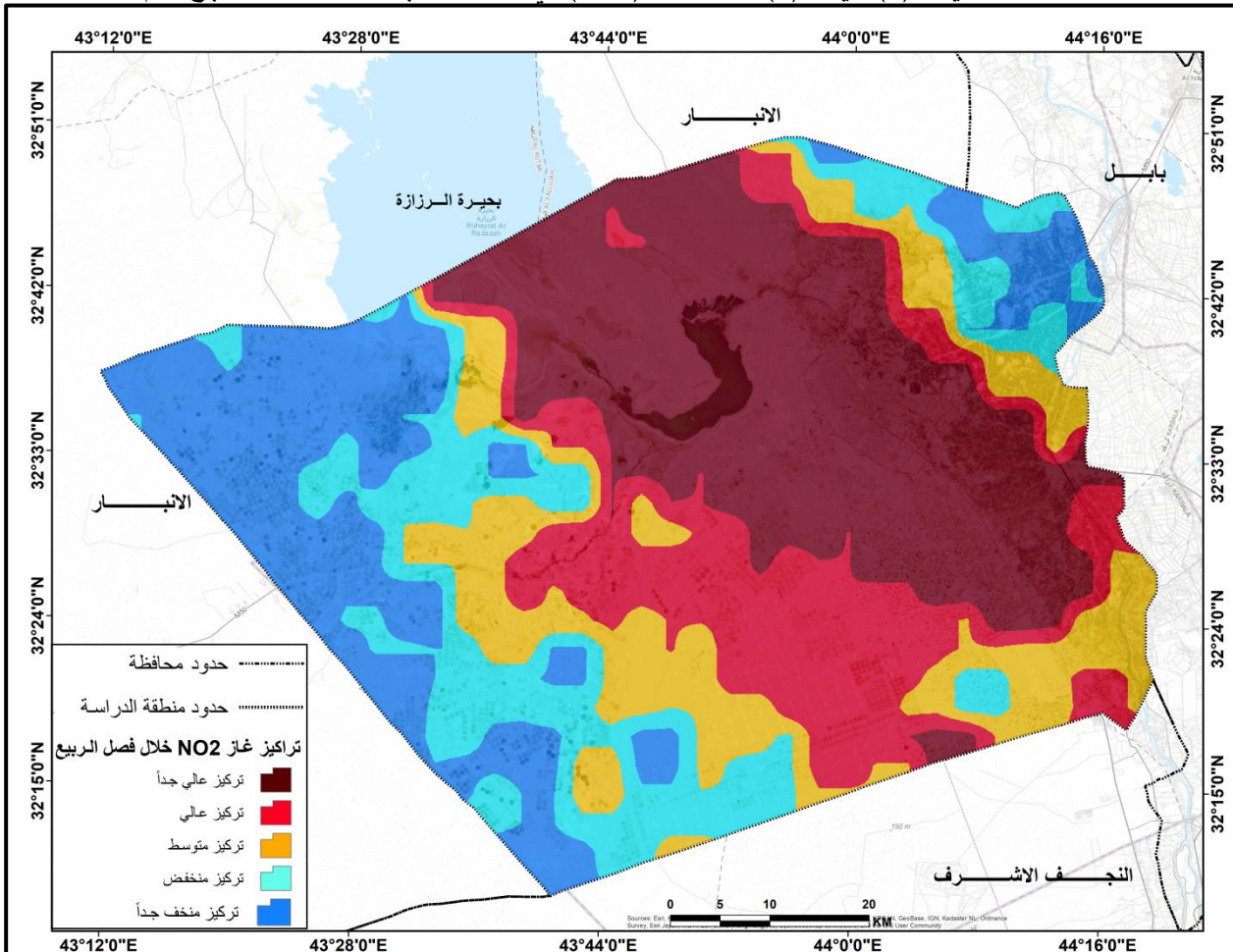
٢-٤ تغير تراكيز غاز ثاني أكسيد النيتروجين (NO_2) خلال فصل الربيع: يتبين من خلال الجدول (٣) وخريطة (٣) أن نتائج تحليل تراكيز غاز ثاني أكسيد النيتروجين NO_2 في محافظة كربلاء خلال موسم الربيع لعام ٢٠٢٣ أظهرت تبايناً ملحوظاً في مستويات التلوث الهوائي فقد بلغت المساحة ذات التركيز العالي جداً (١٧٦١.٦٨) أي ما يعادل ٣٥.١٣% من إجمالي مساحة المحافظة ويعود ارتفاع التركيز في هذه المناطق بشكل رئيسي إلى ازدحام الطرق الرئيسية والمناطق الحضرية وكثافة الحركة المرورية بالإضافة إلى الزيارات الدينية المكثفة التي تزيد من استخدام المركبات وخدمات النقل المحلي مما يؤدي إلى انبعاث كميات كبيرة من أكاسيد النيتروجين أما المناطق ذات التركيز العالي (٦٢٤.١١) أي ١٢.٤٥% من إجمالي المساحة فيعزى ارتفاع التركيز فيها إلى الأنشطة الصناعية الصغيرة مثل الورش والمصانع التي تستخدم الوقود الأحفوري إضافة إلى الاعتماد الجزئي على المولدات الكهربائية المنزلية في بعض الأحياء والتي تساهم في رفع تراكم الغاز محلياً في حين بلغت المساحة ذات التركيز

مجلة الجامعة العراقية المجلد (٧٥) العدد (٤) آذار (٢٠٢٦)

المتوسط (٧٥٥.٤٩) أي ١٥.٠٧٪ ويعزى هذا المستوى إلى تحسن التهوية الجوية في بعض المناطق المفتوحة واعتدال حركة الرياح مع استمرار بعض النشاطات البشرية المعتدلة مثل حركة المركبات الخفيفة والورش الصغيرة مما يؤدي إلى توزيع متوازن للغاز دون تراكم شديد أما المناطق ذات التركيز المنخفض (١٢٣٦.٣١) أي ٢٤.٦٦٪ فترتبط أسباب انخفاض التركيز فيها بابتعاد هذه المناطق عن الطرق الرئيسية والمراكز الحضرية المزدهمة وقلة النشاط الصناعي والسياحي فيها بالإضافة إلى تعرضها للتهوية الطبيعية المفتوحة التي تساعد على تشتت الغازات وأخيراً بلغت المساحة ذات التركيز المنخفض جداً (٦٤٦.٨٧) أي ١٢.٩٠٪ ويعود انخفاض التركيز في هذه المناطق إلى كونها مناطق ريفية أو مفتوحة تحتوي على مساحات زراعية وشوارع قليلة الاستخدام مع غياب تقريباً لأي مصادر صناعية أو مرورية للغاز ما يجعل تراكم NO_2 محدوداً جداً وبناءً على ذلك يظهر أن التوزيع المكاني لتراكيز غاز ثاني أكسيد النتروجين في كربلاء خلال الربيع مرتبط بشكل رئيسي بالتفاعل بين النشاط البشري المكثف في المناطق الحضرية والدينية والعوامل المناخية الموسمية التي تؤثر على تشتت الغازات في الهواء بالتالي، يلاحظ أن تحسن التهوية الجوية وانخفاض الانعكاس الحراري في الربيع ساهم في توزيع تراكيز الغاز بشكل أكثر توازناً، مع استمرار بعض النقاط الساخنة نتيجة الأنشطة البشرية المكثفة. الجدول (٣) مستويات تركيز غاز ثاني أكسيد النتروجين (NO_2) في فصل الربيع

الصف	تركيز _ (mol/m^2)	المساحة/ كم ^٢	%
تركيز عالي جداً	8.75E-5 – 1.0E-4	1761.68	35.13
تركيز عالي	6.25E-5 – 8.75E-5	624.11	12.45
تركيز متوسط	3.75E-5 – 6.25E-5	755.49	15.07
تركيز منخفض	1.25E-5 – 3.75E-5	1236.31	24.66
تركيز منخفض جداً	0.0 – 1.25E-5	646.87	12.90
المجموع		5024.46	100

المصدر: من عمل الباحثة بالاعتماد على خريطة (٣) خريطة (٣) تركيز غاز (NO_2) في محافظة كربلاء خلال فصل الربيع لعام ٢٠٢٣



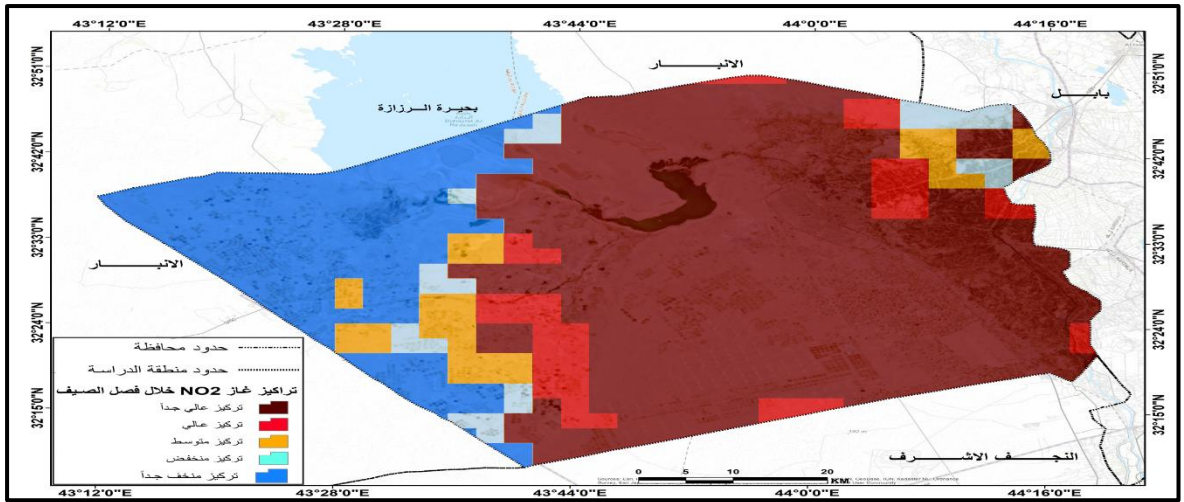
المصدر: من عمل الباحثة بالاعتماد على بيانات القمر الاصطناعي (Sentinel-5P)، ومخرجات برنامج Arcgis.

٤-٣ تغير تراكيز غاز ثاني أكسيد النيتروجين (NO₂) خلال فصل الصيف:

يتبين من خلال الجدول (٤) وخريطة (٤) أن نتائج تحليل تراكيز غاز ثاني أكسيد النيتروجين NO₂ في محافظة كربلاء خلال موسم الصيف لعام ٢٠٢٣ أظهرت تبايناً ملحوظاً في مستويات التلوث الهوائي فقد بلغت المساحة ذات التركيز العالي جداً (٢١٠٠.٤٠) أي ما يعادل ٤.٢٠٪ من إجمالي مساحة المحافظة ويعود هذا الانخفاض في المساحة ذات التركيز العالي جداً إلى اعتدال درجات الحرارة وارتفاع حركة الرياح خلال الصيف مما يعزز من تشتت الجوي للملوثات أما المناطق ذات التركيز العالي (٣٠٠٤.٩٦) أي ٥٩.٩٣٪ من إجمالي المساحة فيعزى ارتفاع التركيز في هذه المناطق إلى النشاط البشري المكثف وخاصة الحركة المرورية الكبيرة على الطرق الرئيسية وقربها من المراكز التجارية والمناطق الحضرية المكتظة إضافة إلى استمرار استخدام المولدات الكهربائية المنزلية في بعض الأحياء وكذلك بعض الأنشطة الصناعية الصغيرة التي تساهم في انبعاث NO₂ في هذه المناطق في حين بلغت المساحة ذات التركيز المتوسط (٦٣٢.٣٤) أي ١٢.٦١٪ ويعزى هذا المستوى إلى المناطق التي تتمتع بتهوية جيدة نسبياً مع وجود حركة مرورية وورش صناعية معتدلة مما يؤدي إلى تراكم معتدل للغاز أما المناطق ذات التركيز المنخفض (٦٧١.٩٦) أي ١٣.٤٠٪ فترتبط أسباب انخفاض التركيز فيها بكونها مناطق بعيدة عن الطرق الرئيسية والمراكز الحضرية المزدهمة مع قلة الأنشطة الصناعية والسياحية فيها إضافة إلى تعرضها للتهوية الطبيعية المفتوحة التي تساعد على تشتت الغاز وأخيراً بلغت المساحة ذات التركيز المنخفض جداً (٥٠٥.٠١) أي ١٠.٠٧٪ ويعود انخفاض التركيز في هذه المناطق إلى كونها مناطق ريفية أو مفتوحة تحتوي على مساحات زراعية وشوارع قليلة الاستخدام مع غياب المصادر الصناعية والمرورية ما يجعل تراكم NO₂ محدوداً جداً وبناءً على ذلك يظهر أن توزيع تراكيز غاز ثاني أكسيد النيتروجين في محافظة كربلاء خلال الصيف مرتبط بشكل رئيسي بالتفاعل بين النشاط البشري المكثف في المناطق الحضرية والعوامل المناخية الموسمية التي تؤثر على تشتت الغازات في الهواء الجدول (٤) مستويات تركيز غاز ثاني أكسيد النيتروجين (NO₂) في فصل الصيف

المنصف	تركيز _ (mol/m ²)	المساحة/ كم ^٢	%
تركيز عالي جداً	8.75E-5 – 1.0E-4	210.40	4.20
تركيز عالي	6.25E-5 – 8.75E-5	3004.96	59.93
تركيز متوسط	3.75E-5 – 6.25E-5	632.34	12.61
تركيز منخفض	1.25E-5 – 3.75E-5	671.96	13.40
تركيز منخفض جداً	0.0 – 1.25E-5	505.01	10.07
المجموع		5024.66	100

المصدر: من عمل الباحثة بالاعتماد على خريطة (٤).خريطة (٤) تركيز غاز (NO₂) في محافظة كربلاء خلال فصل الصيف لعام ٢٠٢٣

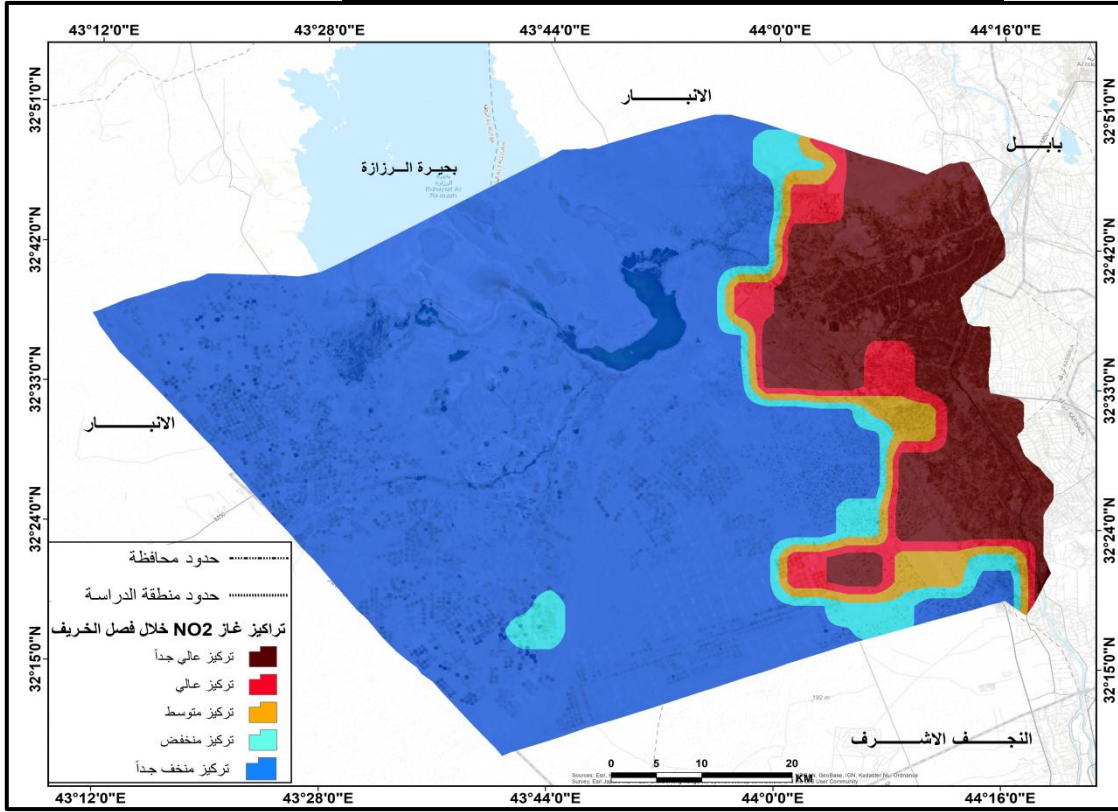


المصدر: من عمل الباحثة بالاعتماد على بيانات القمر الاصطناعي (Sentinel-5P)، ومخرجات برنامج Arcgis.

٤-٣ تغير تراكيز غاز ثاني أكسيد النيتروجين (NO_2) خلال فصل الخريف: يتبين من الجدول (٥) وخريطة (٥) أن نتائج تحليل تراكيز غاز ثاني أكسيد النيتروجين NO_2 في محافظة كربلاء خلال موسم الخريف لعام ٢٠٢٣ أظهرت تبايناً ملحوظاً في مستويات التلوث الهوائي فقد بلغت المساحة ذات التركيز العالي جداً (٩٩٣.٣٦) أي ما يعادل ١٩.٧٨٪ من إجمالي مساحة المحافظة ويعود ارتفاع التركيز في هذه المناطق إلى قربها من الطرق الرئيسية والمراكز الحضرية المكتظة وكثافة حركة المركبات بالإضافة إلى استمرار بعض الأنشطة الصناعية الصغيرة التي تساهم في انبعاث NO_2 أما المناطق ذات التركيز العالي (٢٦٣.٣٧) أي ٥.٢٤٪ من إجمالي المساحة فيعزى وجودها إلى حركة مرورية معتدلة وبعض الأنشطة البشرية المكثفة في مناطق محدودة في حين بلغت المساحة ذات التركيز المتوسط (٩٠٩.٩٧) أي ١٨.١٢٪ ويعزى هذا المستوى إلى توزيع متوازن بين النشاط البشري وتهوية الهواء الطبيعي في هذه المناطق أما المناطق ذات التركيز المنخفض (١٥٢٧.٢٤) أي ٣٠.٤١٪ فترتبط أسباب انخفاض التركيز فيها بكونها مناطق بعيدة عن الطرق الرئيسية والمراكز الحضرية وقليلة النشاط الصناعي والسياحي إضافة إلى تعرضها للتهوية الطبيعية المفتوحة التي تساعد على تشتت الغاز وأخيراً بلغت المساحة ذات التركيز المنخفض جداً (١٣٢٧.٤٣) أي ٢٦.٤٤٪ ويعود انخفاض التركيز في هذه المناطق إلى كونها مناطق ريفية أو مفتوحة تحتوي على مساحات زراعية وشوارع قليلة الاستخدام مع غياب تقريباً لأي مصادر صناعية أو مرورية ما يجعل تراكم NO_2 محدوداً جداً وبناءً على ذلك يظهر أن توزيع تراكيز غاز ثاني أكسيد النيتروجين في محافظة كربلاء خلال فصل الخريف مرتبط بشكل رئيسي بالتفاعل بين النشاط البشري في المناطق الحضرية والعوامل المناخية الموسمية التي تؤثر على تشتت الغازات في الهواء الجدول (٥) مستويات تركيز غاز ثاني أكسيد النيتروجين (NO_2) في فصل الخريف

المنصف	تركيز (mol/m^2)	المساحة/ كم ^٢	%
تركيز عالي جداً	8.75E-5 – 1.0E-4	993.36	19.78
تركيز عالي	6.25E-5 – 8.75E-5	263.37	5.24
تركيز متوسط	3.75E-5 – 6.25E-5	909.97	18.12
تركيز منخفض	1.25E-5 – 3.75E-5	1527.24	30.41
تركيز منخفض جداً	0.0 – 1.25E-5	1327.43	26.44
المجموع		5024.66	100

المصدر: من عمل الباحثة بالاعتماد على خريطة (٥).خريطة (٥) تركيز غاز (NO_2) في محافظة كربلاء خلال فصل الخريف لعام



المصدر: من عمل الباحثة بالاعتماد على بيانات القمر الاصطناعي (Sentinel-5P)، ومخرجات برنامج Arcgis.
الاستنتاجات:

١- أثبتت الأقمار الصناعية، وبالأخص القمر الصناعي Sentinel-5P المزود بمستشعر (TROPOMI)، كفاءتها العالية في رصد وتحديد تراكيز غازات الغلاف الجوي بدقة مكانية وزمانية متقدمة. إذ مكنت البيانات المستخلصة من هذا القمر من تحليل التغيرات في تراكيز غاز ثاني أكسيد النيتروجين (NO_2) على مستوى محافظة كربلاء، وذلك عبر تقنيات نظم المعلومات الجغرافية (GIS) التي أسهمت في إنتاج خرائط مكانية دقيقة تمثّل التوزيع الحقيقي للغاز، مما يعزز إمكانية استخدام هذه البيانات في الدراسات البيئية وتقييم جودة الهواء.

٢- أظهرت نتائج التحليل الزمني والمكاني أن أعلى تراكيز وأوسع مساحة لتلوث الهواء بغاز ثاني أكسيد النيتروجين سجّلت خلال فصل الشتاء، ويعزى ذلك إلى زيادة انبعاثات الغازات الناتجة عن المولدات ووسائل التدفئة إلى جانب استقرار الكتلة الهوائية وقلّة التهوية العمودية، مما يزيد من تراكم الملوثات قرب سطح الأرض.

٣- انخفضت تراكيز الغاز في فصل الصيف نتيجة ارتفاع درجات الحرارة وزيادة معدلات التبخر والحركة الديناميكية للهواء التي تساعد على تشتت الملوثات، فيما كانت قيم التراكيز في فصلي الربيع والخريف متوسطة نتيجة الاعتدال المناخي وتذبذب الأنشطة البشرية والمناخية خلالهما.

التوصيات:

- ٤- يوصى بالاعتماد على بيانات القمر الصناعي Sentinel-5P بشكل دوري لمراقبة التغيرات المكانية والزمانية في تراكيز NO_2 ، وربطها بقاعدة بيانات جغرافية لتسهيل التحليل واتخاذ القرارات البيئية الفعالة.
- ٥- إجراء التحليل الموسمي والدوري لمراقبة تراكيز الغاز على أساس موسمي (الشتاء، الربيع، الصيف، الخريف) لتحديد الفترات الحرجة التي تشهد زيادة في التلوث واتخاذ إجراءات وقائية خاصة خلال هذه الفترات.
- ٦- يوصى ربط البيانات الفضائية مع البيانات الأرضية من خلال دمج قياسات NO_2 من محطات الرصد الأرضية مع بيانات Sentinel-5P للتحقق من دقة النتائج وتحسين نماذج التوزيع المكاني، ولتحديد النقاط الساخنة بدقة أكبر.
- ٧- نشر التوعية البيئية بين سكان المحافظة حول مصادر تلوث الهواء وأهمية الحد من الانبعاثات الناتجة عن المركبات والمولدات المنزلية.
- ٨- إنشاء نظام متابعة دوري يستخدم بيانات Sentinel-5P مع تحديث شهري لتراكمات NO_2 ، مما يتيح إجراء تحليلات زمنية طويلة الأمد ودعم السياسات البيئية المستقبلية.

٩- استخدام تقنيات التعلم الآلي لتنبؤ مستويات NO₂ المستقبلية بناءً على البيانات التاريخية والعوامل المناخية والأنشطة البشرية، مما يتيح اتخاذ إجراءات استباقية للحد من التلوث.

المصادر:

- Keppens, A., Di Pede, S., et al. (2024) “5 years of Sentinel-5P TROPOMI operational ozone profiling and geophysical validation using ozonesonde and lidar ground-based networks.” *Atmos. Meas. Tech.* 17, 3969–3993.
- Douros, J., Eskes, ET AL , (2023), Comparing Sentinel-5P TROPOMI NO₂ column observations with the CAMS regional air quality ensemble.” *Geosci. Model Dev.* 16, 509–523 .
- Judd, L., et al. (2020). Evaluating Sentinel-5P TROPOMI tropospheric NO₂ products. *Atmospheric Measurement Techniques (overview & evaluation of NO₂ products)*.
- Veefkind, J. P., et al. (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*, 120, 70–83.
- ESA: European Space Agency . (2024). Sentinel-5P: TROPOMI instrument overview. Retrieved from <https://www.esa.int>
- KNMI,Royal Netherlands Meteorological Institute). (2023). TROPOMI: Monitoring the atmosphere with unprecedented detail.
- Palmer, P. I., et al. (2021). *The added value of satellite observations of methane for monitoring emissions. Philosophical Transactions A / or review on satellite CH₄ value (paper discussing TROPOMI CH₄ capabilities)*.
- Li, S., et al. (2023). *High-Spatial-Resolution Methane Emissions Calculation Using TROPOMI and ECMWF Winds. Atmosphere (MDPI)*, 14(2), 388.
- Meixin Li, Meixin Li, Yansong Bao, Yansong Bao, (2022), Near-Surface NO₂ Concentration Estimation by Random Forest Modeling and Sentinel-5P and Ancillary Data, *Remote Sens.* 2022, 14(15), 3612; <https://doi.org/10.3390/rs14153612>
- Kezia Lange, et al , (2023), Validation of Sentinel-5P TROPOMI tropospheric NO₂ products by comparison with NO₂ measurements from airborne imaging DOAS, ground-based stationary DOAS, and mobile car DOAS measurements during the S5P-VAL-DE-Ruhr campaign