الباحث

أ.م.د. محمد نوح محمود عدو

التحليل المكاني لكثافة السكان ومستويات التعرض لغاز ثاني اوكسيد النتروجين في مدينة الموصل دراسة في جغرافية السكان

Researcher

Mohamed Noah Mahmoud Adoo

Spatial Analysis of Population Density and Levels of Exposure to Nitrogen Dioxide (NO_2) in Mosul City: A Study in Population Geography

مجلـــــة آداب كركـــــــوك، المجلد (٢)، العدد (٦)، حزيران ، ٢٠٢٦

معلومات الباحث

اسم الباحث الأول: أ.م.د. محمد نوح محمود عدو

البريد الالكتروني:
Mohamedadoo@uokirkuk.edu.iq

الاختصاص العام: جغرافية بشرية

الاختصاص الدقيق: جغرافية سكان

مكان العمل (الحالي):

الكلية: الاداب

الجامعة او المؤسسة: جامعة كركوك

البلد: العراق

الكلمات المفتاحية:

جغرافية السكان، الكثافة السكانية، تلوث الهواء، المخاطر البيئة، التحليل المكاني.

معلومات البحث

تاريخ استلام البحث: ٢٠٢٦/٣/٧

القبول: ٢٠٢٦/٤/١٢

عنوان البحث

التحليل المكاني لكثافة السكان ومستويات التعرض لغاز ثاني اوكسيد النتروجين في مدينة الموصل دراسة في جغرافية السكان

ملخص البحث

تهدف هذه الدراسة إلى ايجاد العلاقة المكانية بين كثافة السكان ومخاطر التعرض لغاز ثاني أكسيد النيتروجين (NO_2) في مدينة الموصل، في إطار جغرافية السكان، وتحليل التفاعل بين التباين المكاني للكثافة السكانية والمخاطر البيئية على صحة السكان. اعتمد البحث على نمذجة الكثافة السكانية باستخدام أداة Point Density، في حين جرى اشتقاق تراكيز غاز (NO_2) من بيانات القمر الصناعي (Sentinel-5P) لإنتاج خريطة تصنيفية لمستويات التلوث على طول اشهر السنة ٢٠٢٥ من ٢٠٢٥/١/١ الى ٢٠٢٥/١٢/٣١ مع احتساب المتوسط السنوي للتراكيز، جرى تنفيذ عمليات الاشتقاق والمعالجة الحسابية عبر انشاء شيفرة برمجية ضمن منصة (Google Earth Engine) المحلق (١) عبر رمز الاستجابة السريعة(QR- Code) . اجري التحليل المكاني باستخدام Map Algebra لإيجاد العلاقة التفاعلية بين طبقتي الكثافة السكانية وتركيز الغاز، مع ادخال مؤشر الغطاء النباتي المعياري(NDVI) ومؤشر المياه المعياري(NDWI) لاستبعاد المناطق الخضراء والمسطحات المائية من التحليل التعرض الفعلي، ، اسفر التحليل عن تصنيف المجال الحضري لمدينة الموصل إلى أربع فئات تعرض الهواء للسكان (هواء نقي، هواء قليل التلوث، هواء متوسط التلوث، وهواء عالي التلوث)

مجلة آداب كركوك / كلية الآداب / جامعة كركوك
مؤسسة العراق/وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Kirkuk Journal of Arts, Volume (2) Number (6),, June, 2026

Researcher information

Researcher: Mohamed Noah Mahmoud Adoo

E-mail: Mohamedadoo@uokirkuk.edu.iq

General Specialization: Human Geography

Specialization: Population Geography

Place of Work (Current):

Department: Applied Geography

College: College of Arts

University or Institution Kirkuk University

Country: Iraq

Key words: Population Geography, Population Density, Air Pollution, Spatial Analysis, Environmental Risk, Air Quality.

Search information

Search Receipt history: 7/3/2026

Acceptance: 12/4/2026

college of Arts / Kirkuk University / Republic of Iraq Ministry of Higher education and scientific research

The Title

Spatial Analysis of Population Density and Levels of Exposure to Nitrogen Dioxide (NO_2) in Mosul City: A Study in Population Geography

Abstract

This study aims to examine the spatial relationship between population density and the risk of exposure to nitrogen dioxide (NO_2) in Mosul City within the framework of Population Geography. It focuses on the interaction between spatial variations in demographic concentration and environmental health risks. Population density was modeled using the Point Density tool, while NO_2 concentrations were derived from Sentinel-5P satellite data to produce a classified pollution map covering the period from January 1, 2025, to December 31, 2025, with the annual mean concentration calculated.

Data processing and atmospheric concentration retrieval were conducted through a custom-developed script within the Google Earth Engine platform (see Appendix 1 via QR Code). Spatial analysis was performed using Map Algebra to identify the interactive relationship between population density and NO_2 concentration layers. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the Normalized Difference Water Index (NDWI) were incorporated to exclude vegetated areas and water bodies from the effective human exposure analysis.

The results classified the urban domain of Mosul into four population exposure categories: clean air, low pollution, moderate pollution, and high pollution. For each category, the total area, population counts, and percentage distribution were calculated to determine the spatial structure of environmental exposure..

المقدمة

أصبحت مشكلة تلوث الهواء من أبرز القضايا البيئية المعاصرة التي تواجه سكان المدن الحديثة، لما لها من انعكاسات مباشرة وغير مباشرة على صحة الإنسان وجودة الحياة، ويعد غاز ثاني أكسيد النيتروجين (NO_2) من أخطر ملوثات الهواء في البيئات الحضرية، نظرًا لارتباطه الوثيق بمصادر الاحتراق المحلية المختلفة، ولا سيما عوادم المركبات، والأنشطة الصناعية، ومحطات توليد الطاقة، فضلًا عن دوره في تكوين ملوثات ثانوية مثل الأوزون الأرضي والجسيمات الدقيقة.

وتكتسب دراسة تلوث الهواء من منظور جغرافي أهمية خاصة، إذ لا يقتصر الاهتمام على قياس مستويات التلوث فحسب، بل يمتد إلى تحليل توزيعه المكاني، وتبايناته الزمانية، وعلاقته بالأنماط السكانية والكثافة الديموغرافية، انسجامًا مع جوهر الفكر الجغرافي القائم على تفسير الظواهر ضمن إطارها المكاني والبيئي، وفي هذا السياق تمثل المدن النامية ومنها مدينة الموصل نماذج حضرية معقدة تشهد تصاعدًا في الضغوط البيئية نتيجة النمو السكاني المتسارع، والتوسع العمراني غير المنظم، وارتفاع الكثافة المرورية إلى جانب محدودية محطات الرصد البيئي الأرضية.

ومع التطور المتسارع في تقنيات الاستشعار عن بعد، أصبح بالإمكان رصد ملوثات الهواء على نطاقات مكانية واسعة وبدقة زمنية منتظمة، مما أسهم في تقليص الفجوة المعرفية الناجمة عن نقص البيانات التقليدية، ويعد القمر الصناعي (Sentinel-5P)، المزود بمستشعر (TROPOMI)، من أبرز الأدوات الحديثة في رصد الغازات الملوِّثة في الغلاف الجوي، إذ يوفر بيانات عالية الدقة حول تراكيز ثاني أكسيد النيتروجين، بما يتيح إجراء تحليلات مكانية معمقة على المستوى الحضري.

وانطلاقًا من ذلك، تسعى هذه الدراسة إلى توظيف منهج التحليل الجغرافي المكاني المعتمد على نظم المعلومات الجغرافية وتقنيات الاستشعار عن بعد لقياس وتحليل التوزيع المكاني لتلوث الهواء بغاز (NO_2) في مدينة الموصل، والكشف عن علاقته وتأثيره في السكان من خلال إبراز أبعاده البيئية والصحية بما يسهم في دعم صناع القرار والمخططين الحضريين بمؤشرات مكانية دقيقة تساعد على تحسين جودة الهواء وتعزيز استدامة البيئة.

اولاً– مشكلة البحث

تتمثل المشكلة البحثية في غياب نموذج مكاني كمي يحدد مناطق التداخل بين الكثافات السكانية المرتفعة ومستويات التلوث العالية، ويكشف عن التفاوت المكاني في مخاطر التعرض البيئي داخل المجال الحضري، بما يسمح بتوجيه التخطيط البيئي والصحي على أسس مكانية دقيقة.

ويمكن صياغة مشكلة البحث حسب ما يأتي:-

١. ما طبيعة العلاقة المكانية بين كثافة السكان وتراكيز غاز ثاني أكسيد النيتروجين (NO_2) في مدينة الموصل خلال عام ٢٠٢٥؟
٢. كيف يتوزع السكان مكانيًا وفق نموذج الكثافة السكانية وأين تتقاطع مناطق الكثافة المرتفعة مع مستويات التلوث العالية؟
٣. ما حجم السكان المعرضين لكل مستوى من مستويات التلوث؟

ثانياً:- فرضيات البحث

١. توجد علاقة مكانية طردية بين ارتفاع الكثافة السكانية وارتفاع تراكيز غاز(NO_2).
٢. تتباين مستويات التعرض البيئي داخل المدينة تبعًا لاختلاف البنية العمرانية والكثافة المرورية.
٣. تشكل المناطق ذات الكثافة المرتفعة بؤرًا مكانية لمخاطر صحية أعلى مقارنة بالمناطق منخفضة الكثافة.

ثالثاً:- أهداف البحث

١. قياس وتحليل التوزيع المكاني لتراكيز غاز(NO_2) في مدينة الموصل لعام ٢٠٢٥.
٢. نمذجة الكثافة السكانية باستخدام أدوات التحليل المكاني.
٣. تحديد مناطق التداخل بين التلوث الهوائي والكثافة السكانية.
٤. تصنيف المدينة إلى فئات تعرض بيئي.
٥. احتساب أعداد السكان ونسبهم ضمن كل فئة تعرض.
٦. دعم التخطيط البيئي والصحي بمؤشرات مكانية دقيقة.

رابعاً: -أهمية البحث

١. تعزيز البعد الكمي في جغرافية السكان.
٢. دمج تقنيات الاستشعار عن بعد مع التحليل الديموغرافي المكاني.
٣. تقديم نموذج تطبيقي لاستخدام بيانات القمر الصناعي (Sentinel-5P) في الدراسات الحضرية.
٤. تحديد المناطق ذات الأولوية في التدخل البيئي.
٥. دعم صناع القرار بمعلومات دقيقة حول التفاوت المكاني في المخاطر.
٦. الإسهام في الحد من الأمراض المرتبطة بتلوث الهواء.

خامساً:- منهج البحث

اعتمدت الدراسة على المنهج الوصفي التحليلي المكاني ذي الطابع الكمي، بوصفه المنهج الأنسب لتحليل التباينات المكانية في توزيع الظواهر البيئية والديموغرافية وقياس العلاقات المتبادلة بينها داخل الحيز الحضري، ويستند هذا المنهج إلى معالجة البيانات الرقمية واستخدام تقنيات نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بُعد لإنتاج مؤشرات مكانية دقيقة تعكس أنماط التفاعل بين السكان والبيئة.

سادساً:- منهجية العمل التطبيقي والتقني للبحث شكل (١)

١- المدخلات (الصناديق العلوية)

- بيانات الأقمار الصناعية المعتمدة ((Sentinel-5P) (TROPOMI)):
- تراكيز ثاني أكسيد النيتروجين (NO_2).
- الفترة: ٢٠٢٥/١/١ - ٢٠٢٥/١٢/٣١.

٢- الاستشعار عن بعد:

- معالجة البيانات في منصة (Google Earth Engine).
- المعدلات السنوية وخرائط التلوث.

٣- تحليل نظم المعلومات الجغرافية (GIS):

- نمذجة كثافة النقاط (الكثافة السكانية)
- الجبر الخرائطي (تراكيز NO_2 + السكان- مؤشرات النبات (NDVI) - مؤشر المياه السطحية (NDWI)

٤- التحليل القائم على الخلايا (Raster-Based Analysis)

- التطابق المكاني (Spatial Overlay).
- تصنيف التعرض: (هواء نظيف ، تلوث منخفض، تلوث متوسط، تلوث مرتفع)

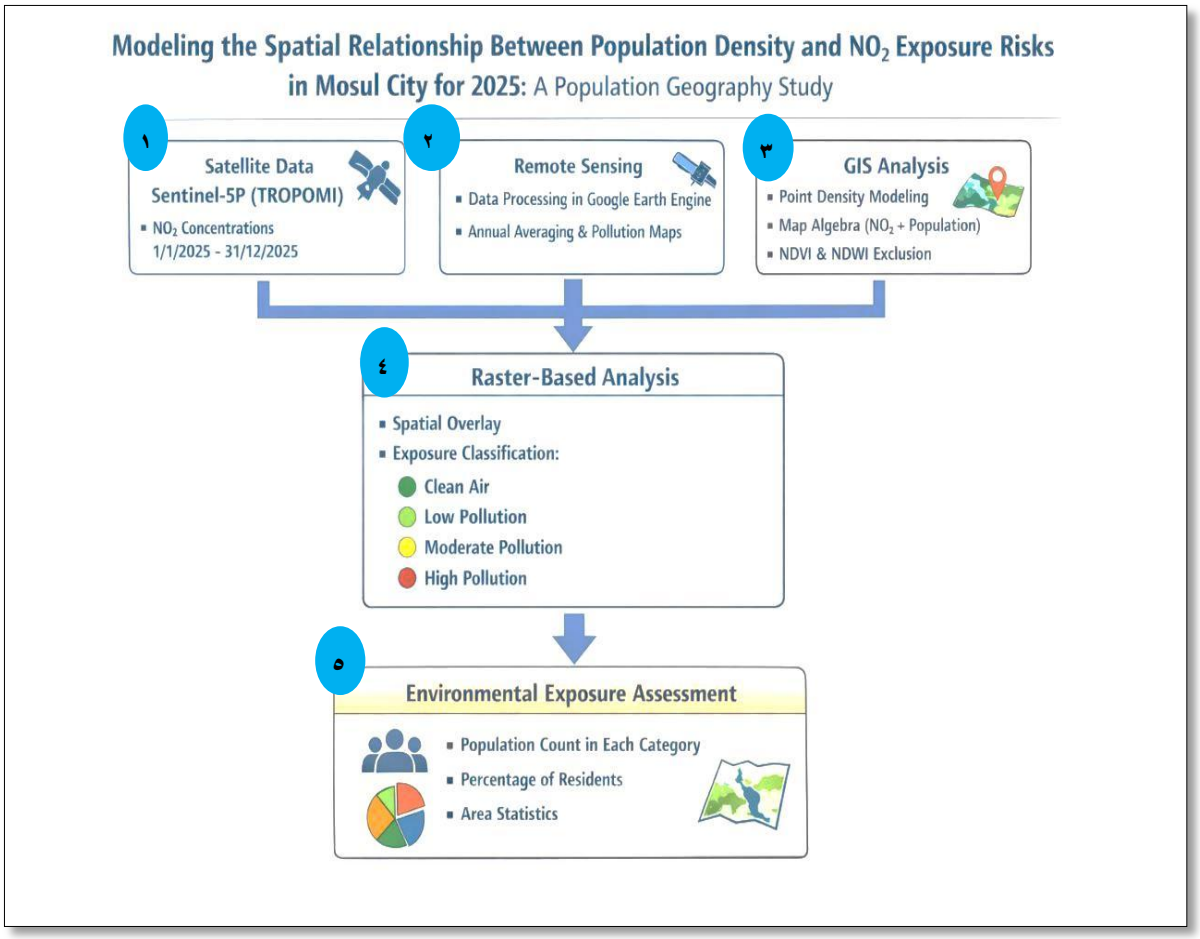
٥- تقييم التعرض البيئي (المخرجات النهائية)

- عدد السكان في كل فئة ونسبتهم .

سابعاً– الموقع الجغرافي والفلكي لمنطقة الدراسة

تقع مدينة الموصل في الجزء الشمالي الغربي من العراق ضمن محافظة نينوى، على ضفتي نهر دجلة الغربية والشرقية ، وتعد من أهم المراكز الحضرية في شمال العراق لما تتمتع به من موقع جغرافي يربط بين مناطق الجزيرة الفراتية والمرتفعات الشمالية.

أما فلكياً، تنحصر مدينة الموصل بين دائرتي عرض (″30 ′13 °36) و (″30 ′25 °36) شمالاً، وبين خطي طول (″30 ′3 °42) و (″30 ′14 °42) شرقاً، حسب الخرائط المثبتة في البحث.



شكل (١) منهجية العمل التطبيقي والتقني للبحث

المصدر : من عمل الباحث اعتماد على منهجية العمل

١– نمذجة التوزيع المكاني لسكان مدينة الموصل باعتماد اداة Point Density

تمثل دراسة السكان المحور الأساسي لهذا البحث، إذ ينصب الهدف الرئيس على تحليل التوزيع المكاني للسكان داخل مدينة الموصل وتحديد مناطق المخاطر الهواء الملوث ضمن مساحات تواجدهم،

من خلال الكشف عن مناطق تركز الكثافات السكانية المرتفعة ومناطق الانخفاض السكاني، وتحديد أنماط انتشار السكان على مستوى الأحياء السكنية ضمن مجال الدراسة، اعتماداً البحث على أداة Point Density) ضمن بيئة نظم المعلومات الجغرافية (GIS)، لما توفّره من قدرة تحليلية عالية في تحويل البيانات النقطية الممثلة لتوزيع السكان إلى خرائط كثافة مكانية، وتعمل هذه الأداة على حساب عدد النقاط ضمن وحدة مساحة محددة، مما يسمح بإنتاج خريطة توضح مناطق التجمع السكاني المكثف مقابل المناطق ذات الكثافة المنخفضة، وتسهم هذه النمذجة في تحليل التجمعات السكانية وفهم انماط التركز والانتشار داخل منطقة البحث.

إذ تساعد على إبراز التفاوت المكاني في توزيع السكان، وتسهّل فهم العلاقة بين الكثافة السكانية والعوامل الحضرية والبيئية والخدمية داخل المدينة، بما يدعم التحليل الجغرافي واتخاذ القرارات التخطيطية المستقبلية وامكانية ايجاد العلاقات المكانية بين السكان والظواهر الاخرى (Wang, Peng, & Zhang, 2023).

استنادًا إلى الخريطة (١) تظهر النتائج الاولية لنمذجة الكثافة السكانية باستخدام أداة Point Density تباينًا واضحًا في أنماط التوزيع السكاني، حيث يبرز اتجاهان رئيسان لتمركز السكان في المدينة، ويلاحظ اتساع مساحة كثافة السكان في الجهة الشرقية مقارنة بالجهة الغربية، في مقابل تدرج تنازلي في الكثافة السكانية كلما اتجهنا نحو الأطراف الحضرية للمدينة.

ويعرض الجدول (١) اصناف التوزيع المكاني للكثافات السكانية وفق ثلاثة تصنيفات اولية شملت كامل المساحة الحضرية للمدينة البالغة (٢٠٥ كم^2)، وتشمل هذه المساحة (٢٥١) حيًا سكنيًا، إذ يقدر العدد الكلي للسكان بنحو (١٧٩٢٠٠٠) نسمة لعام ٢٠٢٤ اما الكثافة العامة بلغت (٨٧٤) نسمة/ كم^2 (جمهورية العراق وزارة التخطيط، ٢٠٢٤).

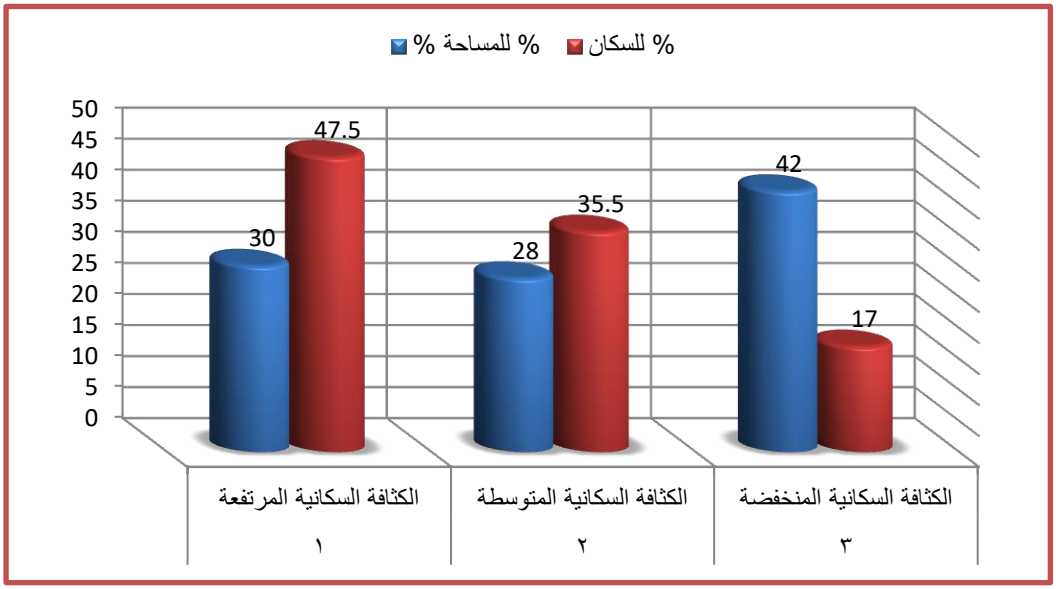
مع وجود تفاوت ملحوظ في الأحجام السكانية ومستويات الكثافة بين الاصناف الثلاثة كما في الشكل (٢) .

جدول (١) اصناف الكثافات السكانية ونسبتها من المساحة الكلية من مدينة الموصل

ت	الصنف	المساحة كم^{٢}	% للمساحة	عدد السكان	% للسكان
١	الكثافة السكانية المرتفعة	٦٣	٣٠	٨٥٢٦٤٠	٤٧,٥
٢	الكثافة السكانية المتوسطة	٥٧	٢٨	٦٣٧٦٠٠	٣٥,٥
٣	الكثافة السكانية المنخفضة	٨٥	٤٢	٣٠١٧٦٠	١٧
٤	مجموع مساحة الاصناف	٢٠٥	١٠٠	١٧٩٢٠٠٠	١٠٠

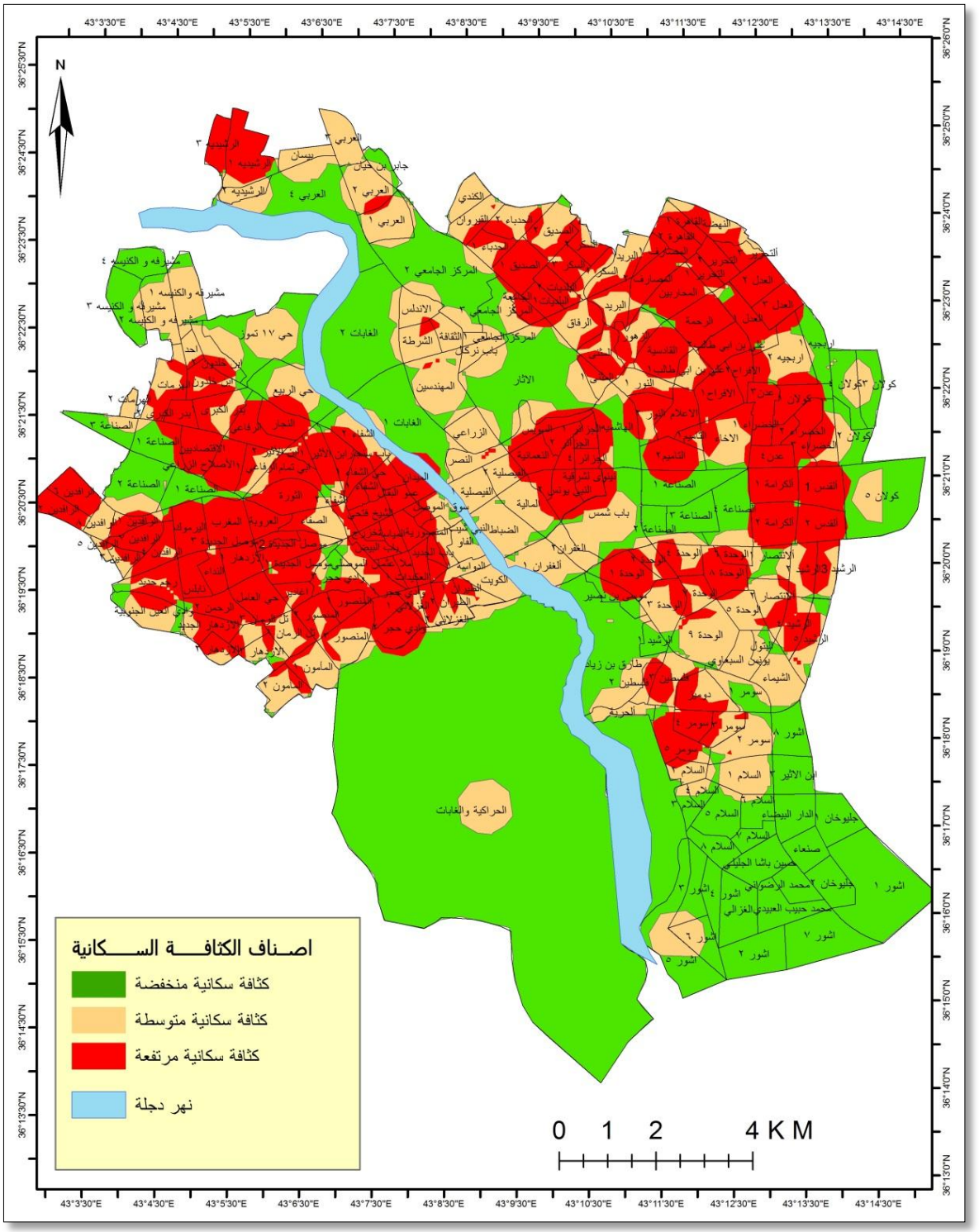
المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على بيانات التعداد السكاني لسنة ٢٠٢٤

شكل (٢) اصناف الكثافات السكانية ونسبتها من المساحة الكلية من مدينة الموصل



المصدر : من عمل الباحث بالاعتماد على جدول (١)

خريطة (١) التوزيع المكاني للكثافة السكانية في مدينة الموصل



المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على بيانات التعداد السكاني لسنة ٢٠٢٤

٢- تلوث الهواء في مدينة الموصل بـ بغاز ثاني اوكسيد النتروجين (NO_2)

تؤكد الدراسات الحديثة أن التعرض طويل الأمد لغاز (NO_2) يرتبط بارتفاع معدلات الوفيات المبكرة وأمراض الجهاز التنفسي (Landritgan, 2018). كما أظهرت تحليلات مكانية حديثة وجود تفاوت مكاني في توزيع التلوث يرتبط بالكثافة السكانية والخصائص الاجتماعية، مما يعكس بعداً للعدالة البيئية في التعرض للمخاطر (Clark , L,P., Millet,D.B, & & Marshall,j.d, 2014). وقد أصبح توظيف أدوات نظم المعلومات الجغرافية وبيانات الأقمار الصناعية مثل (Sentinel-5P) أداة مركزية في تحليل أنماط التعرض السكاني للتلوث بالغازات (van Geffen, J., Boersma, K. F, & Eskes, H., 2020). يعد النقل الحضري المستهلك الأكبر للطاقة والمصدر الرئيس للانبعاثات في البيئة الحضرية، نتيجة الانبعاثات الغازية اذ تتركز الغازات الملوثة في الشوارع ذات الكثافة المرورية العالية اضافة الى انتشار المولدات الكهربائية داخل احياء المدينة (الراوي، ٢٠٠٦). وقد ركز البحث على دراسة الغاز الملوث (NO_2) وهنا نسأل لماذا نركز على دراسة تلوث الهواء بغاز NO_2 أكثر من(CO_2) ؟ ان التركيز على غاز ثاني أوكسيد النيتروجين (NO_2) في الدراسات الحضرية يعود إلى طبيعته الملوثة محليًا اي انه انتاج محلي يتركز في الاجواء المسببة له، بخلاف غاز ثاني أوكسيد الكربون (CO_2) الذي يعد بالدرجة الأولى غازًا مناخيًا عالميًا يخضع الى التوازن في الغلاف الجوي (Word Health Organization, 2013).

يشير(NO_2) إلى ثاني أكسيد النيتروجين (Nitrogen Dioxide) وهو أحد أكثر الغازات سمية وانتشاراً المرتبطة بقطاع النقل والصناعات ذات المدخان، ويعد مؤشراً حيوياً لجودة الهواء في المناطق الحضرية ينتج هذا الغاز بشكل أساسي عن عمليات الاحتراق الداخلي في محركات المركبات (خاصة محركات الديزل) ودخان المصانع (الظاهر، ٢٠٠١).

اما من الناحية الجغرافية يتركز هذا الغاز في "الممرات النقلية الكثيفة" لذا تجد أن أعلى مستويات تركيزه تكون دائماً بالقرب من الطرق السريعة ومراكز المدن المزدحمة مشكل ما يعرف بظاهرة "أودية التلوث" (Urban Canyons)(Bzdziuch, Bogack, & Oleniacz, 2024) .

ومصطلح الاودية الحضرية مهم جداً، حيث يتفاعل هذا الغاز مع المورفولوجيا الحضرية في الشوارع الضيقة المحاطة بمبانٍ مرتفعة لا تستطيع الرياح تشتيت الغاز، مما يؤدي إلى تراكمه بتركيزات تفوق

المعايير الصحية العالمية، ويخلق ما يشبه "الخندق" الملوث داخل النسيج العمراني، وهنا لابد من الاشارة الى الأثر البيئي والمناخي للضباب الدخاني (Smog) (العجيلي، ١٩٩٦).

اذ يتفاعل غاز(NO_2) مع ضوء الشمس ومركبات أخرى لينتج "الأوزون الأرضي" (O_3) وهو المكون الرئيسي للضباب الدخاني الذي يحجب الرؤية في المدن، وتعتبر الأمطار الحمضية احد نتائج هذا الغاز الذي يساهم في تكوين حمض النيتريك، مما يؤدي إلى هطول أمطار حمضية تؤثر على المباني التاريخية والتربة والنباتات المحيطة بطرق النقل ويعتبر احد اسباب ظاهرة ما يعرف بالتهرؤ الحضري وهذا ما يظهر جلياً في مراكز المدن القديمة التي تعتبر حالياً نواة المدينة الحديثة (WU, ELdoesok, & Morello, 2025).

اما الأثر الصحي لهذا الغاز على السكان اذ يسبب مشاكل تنفسية حادة (مثل الربو والتهاب الشعب الهوائية) للسكان وخاصة فئة صغار السن والكبار، ومن الناحية الجغرافية تظهر هنا مشكلة "عدم العدالة البيئية" حيث غالباً ما تسكن الفئات الاجتماعية الأقل دخلاً في مناطق قريبة من محاور الشحن والطرق الكبرى، مما يجعلها الأكثر عرضة لمخاطر هذا الغاز (Hoy, Mohan, & Nolan, 2025).

٣- الاهمية الجغرافية لقياس تلوث الهواء بغاز(NO_2) باعتماد الاستشعار عن بعد مقارنة بمحطات الرصد الارضية

يقاس تلوث الهواء بطريقتين رئيسيتين في الدراسات العلمية الطرق التقليدية المعتمدة على محطات الرصد الأرضية وطرق الاستشعار عن بُعد باستخدام بيانات الأقمار الصناعية لكل منهما مزايا وقيود في فهم جودة الهواء بشكل شامل ، في الأسلوب التقليدي، تعتمد القياسات على محطات رصد جوية ثابتة تزوّد بأجهزة تحليل كيميائية مثل أجهزة (Chemiluminescence) للحصول على بيانات دقيقة عند مستوى السطح، وتستخدم هذه البيانات في التقييم القانوني والبيئي لمستويات(NO_2) ، نظرًا لدقتها العالية زمنيًا وقدرتها على تمثيل التغيرات اللحظية في الموقع الذي تثبت فيه المحطة، ومع ذلك تقتصر هذه المحطات على نقاط محدودة داخل المدينة، مما يؤدي إلى تمثيل مكاني محدود يقلل من القدرة على تفسير التباين المكاني داخل المناطق الحضرية الكبيرة، كما يتطلب إنشاءها وصيانتها تكلفة مالية وفنية عالية مما يجعل وجودها ضعفًا في العديد من المدن وخاصة في الدول النامية أو المتضررة من النزاعات

ولهذا يمكن اعتبارها من الناحية الدراسات الجغرافية غير مجدية، على الجانب الآخر (Jimenez, Viloria, & Brovelli, 2023) .

تستخدم تقنيات الاستشعار عن بعد بيانات الأقمار الصناعية مثل (Sentinel-5P) مزود بمستشعر (TROPOMI) ضمن مجموعة اقمار كوبرنيكونوس الاوربية لرصد التلوث ومنها تركيزات غاز (NO_2) في عمود الغلاف الجوي عبر التحليل الطيفي للأشعة اذ توفر هذه التقنية تغطية مكانية واسعة وشاملة تمتد على كامل مساحة المدينة مع تكرار زمني منتظم (غالبًا يوميًا) مما يمكن من تحليل الأنماط المكانية لتلوث الهواء وربطها بأنماط الاستخدامات الأرضية والكثافة السكانية، وهو ما يصب في صلب التحليل الجغرافي المكاني والاهتمامات البحثية للجغرافي (الخياط، ٢٠٢١).

وفي كل الاحوال لا تعتبر الدراسات الجغرافية قاصرة في الاعتماد على بيانات الاستشعار عن بعد لدراسة التلوث الهوائي، وقد أظهرت دراسات مقارنة أن بيانات (Sentinel-5P) تظهر اتجاهات مكانية تتفق مع القياسات الأرضية، رغم أن القيم المطلقة قد تختلف عند قرب مصادر التلوث المحلية مثل الطرق السريعة بسبب الاختلافات في مستوى القياس (العمود الجوي مقابل السطح) تشير الأبحاث إلى أن الأنماط العامة لاتجاهات(NO_2) في البيانات الفضائية تتماشى مع المحطات الأرضية عند الابتعاد عن المصادر المباشرة للحركة المرورية، مما يعزز جدوى استخدام بيانات الأقمار الصناعية كأداة تكاملية للمراقبة البيئية (Acker, Holloway, & Harkey, 2025).

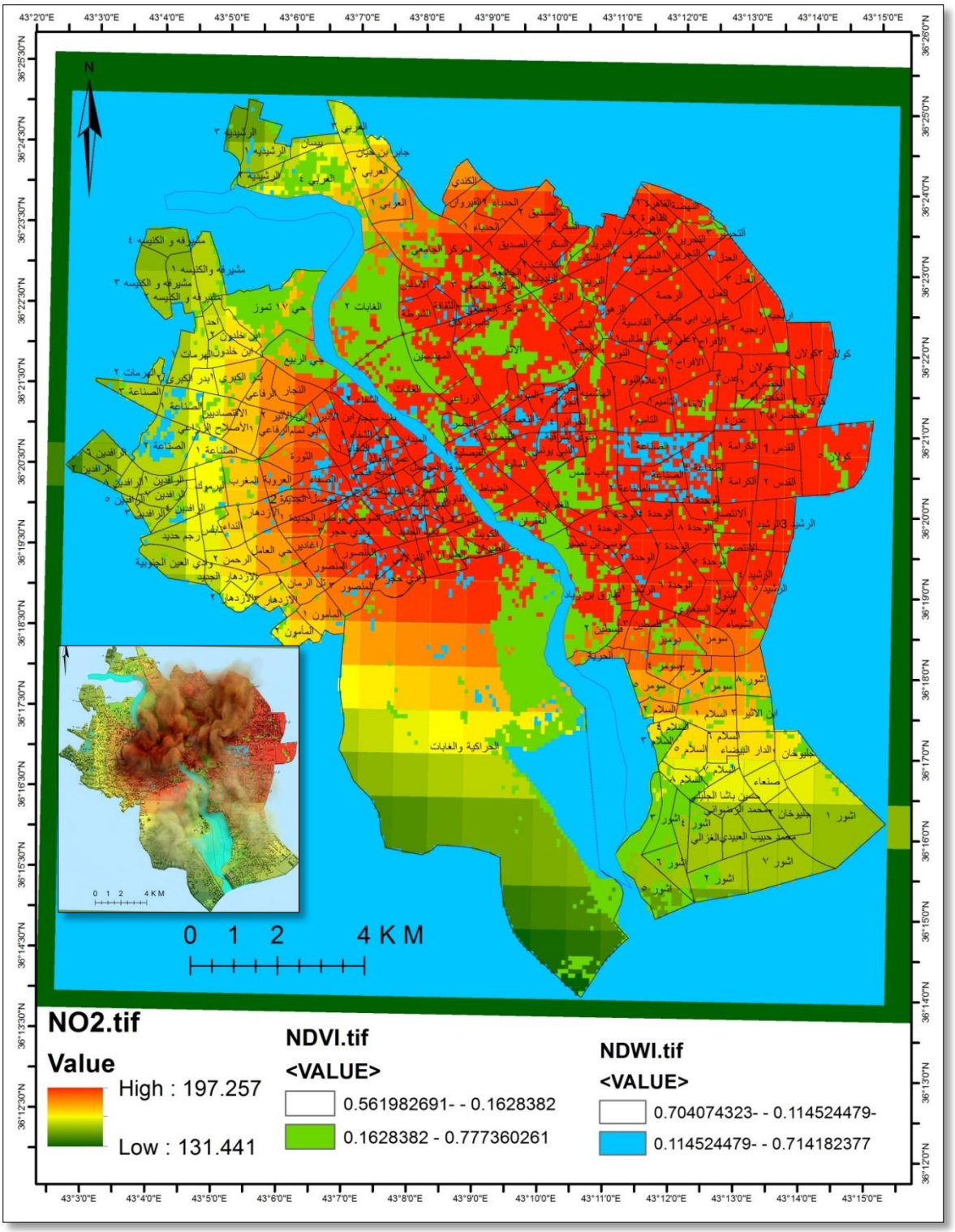
وقد أجرى تحليلًا مقارنًا بين بيانات (Sentinel-5P) والمحطات الأرضية في إقليم كاتالونيا (إسبانيا)، ووجدوا ارتباطًا معتدلًا بين القياسات الفضائية والمحطات الأرضية، مع اختلافات تبعًا للمناطق العمرانية وأنواع المحطات، مما يدل على امكانية الاعتماد على البيانات الاقمار الاصطناعية لتحقيق فهم مكاني أدق لتلوث الهواء في المدن لتطابق النتائج مع المحطات الارضية لرصد التلوث الهوائي بهذا الغاز مع تعزيز الجانب الاقتصادي وتقليل تكاليف وخاصة في البلدان الفقيرة او النامية (Santos & Pares, 2025).

وقد اعتمد البحث الاستشعار عن بعد للحصول على بيانات التلوث الهوائي بغاز(NO_2) من خلال القمر الاصطناعي (Sentinel -5P) ومطابقة حدود منطقة الدراسة بطبقة المضلعات بصيغة

(shapefile) ولغرض اشتقاق البيانات لإكمال مهمة البحث تم الانتقال الى منصة GEE وانشاء كود حسب (QR- cod) المرفق في ملحق (١) الذي صنف وقسم مستويات التلوث حسب وحدات القياس(MOL/M2) مول / متر مربع وهو يمثل كمية (NO_2) في عمود هوائي يمتد من سطح الارض الى أعلى الغلاف الجوي وهي وحدة معتمدة في بيانات الأقمار الصناعية مثل (Sentinel-5P)، وتستخدم لتحليل التباين المكاني للتلوث الهوائي على المستوى الحضري والإقليمي خريطة (2) .

كما تم اضافة مؤشرات اخرى تؤثر على تقليل التلوث لتحديد درجة او مدى خطورة التلوث في مدينة الموصل تمثل في مؤشر الغطاء النباتي (NDVI) ومؤشر الكشف عن المسطحات المائية (NDWI) للخروج بخريطة اولية وتصنيفها حسب خطورة التلوث لتظهر بأربعة اصناف ضمن أربعة اقاليم اذا اظهرت المؤشرات شدة تباين النباتي ومؤشر المسطحات المائية على المخرجات وقلصتها من سبع اصناف حسب الكود في (QR- cod) ملحق (١) الى أربعة اصناف.

خريطة (٢) اقاليم التلوث بغاز NO_2 لمدينة الموصل لسنة ٢٠٢٥ مع مؤشرات التباين النباتي والمياه السطحية



المصدر : من عمل الباحث بالاعتماد على بيانات القمر الاصطناعي (Sentinel-5p) (المزود بمستشعر (TROPOMI) لرصد تركيزات غاز NO_2 لسنة ٢٠٢٥.

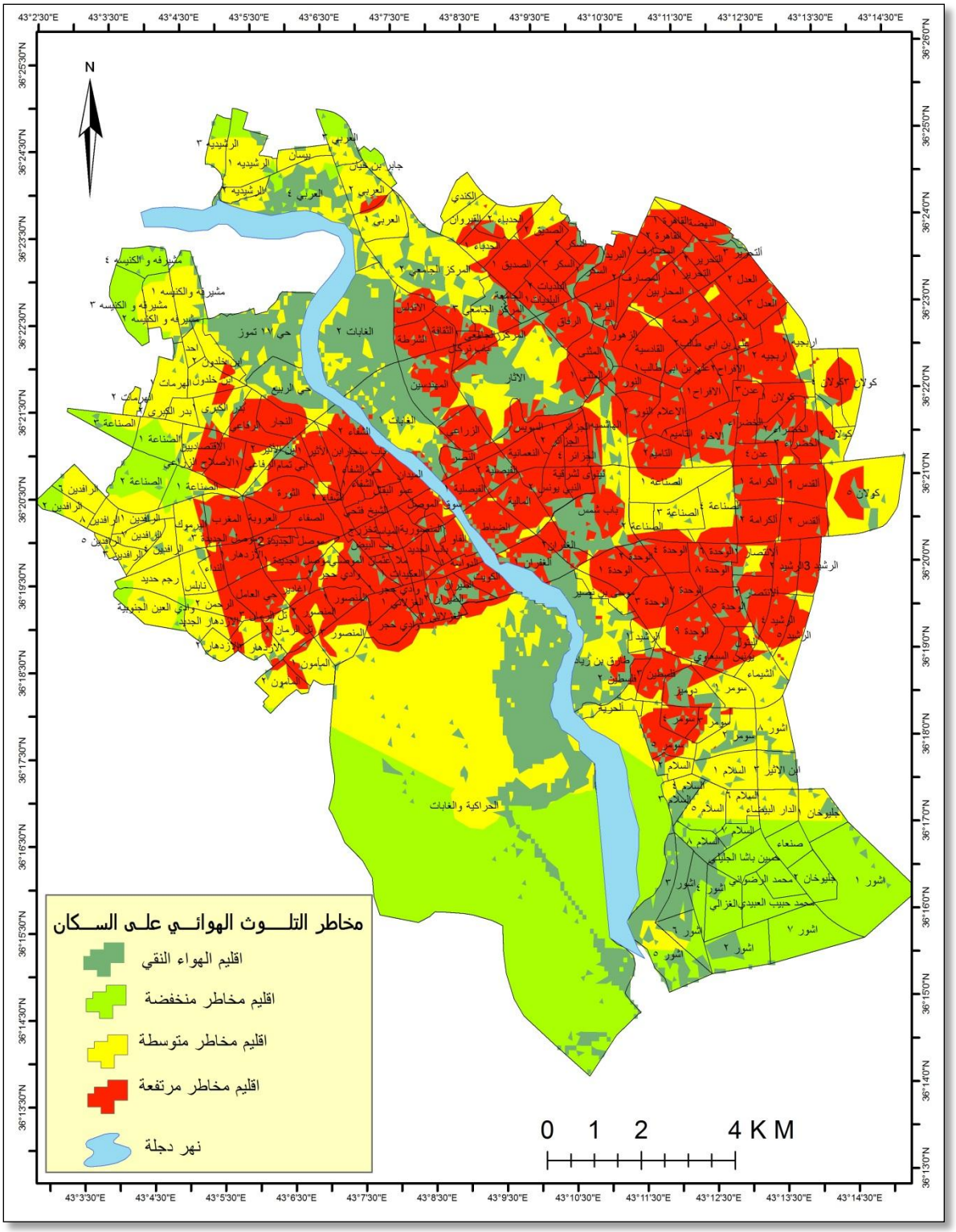
٤- العلاقة المكانية لمخاطر التلوث الهوائي بغاز(NO_2) على سكان مدينة الموصل

يعد بناء العلاقة المكانية (Building Spatial Relationship) بين توزيع السكان وتلوث الهواء من القضايا الجغرافية المعاصرة التي تستدعي توظيف أدوات تحليلية في بيئة البرنامج قادرة على دمج البعد البيئي مع البعد البشري ضمن إطار مكاني واحد (علي و حبو، ٢٠١١). ويبرز غاز ثاني أكسيد النيتروجين (NO_2) بوصفه أحد الملوثات الحضرية الرئيسة المرتبطة بالأنشطة البشرية، ولاسيما حركة النقل، والكثافة المرورية، والتوسع العمراني غير المنظم، مما يجعل توزيعه المكاني غير متجانس ويتقاطع بصورة مباشرة مع أنماط التركز السكاني .

وفي هذا السياق يعد الجبر الخرائطي (Map Algebra) أحد أكثر الأساليب كفاءة في تحليل العلاقات المكانية المركبة، إذ يتيح دمج طبقات مكانية متعددة تمثل متغيرات مختلفة سكانية وبيئية ضمن نموذج رياضي مكاني موحّد، وتعتمد هذه المنهجية على إعادة تصنيف القيم المكانية لكل طبقة (Layer) وتحويلها إلى أوزان نسبية تعكس درجة تأثيرها في ظاهرة التلوث بغاز(NO_2) بما يسمح بقياس التداخل المكاني بين مصادر التلوث ومناطق الكثافة السكانية بعد نمذجتها، وتعتمد هذه المنهجية التحليلية على افتراض أن التأثير الصحي والبيئي لتلوث الهواء لا يرتبط فقط بمستوى تركيز الملوث، بل أيضًا بدرجة تعرض السكان له، وهو ما يفرض ضرورة إعطاء وزن أعلى للطبقات التي تمثل الكثافة السكانية بالقرب من المناطق السكنية ذات المحاور المرورية، ومصادر الانبعاثات، مقابل أوزان أقل للطبقات ذات التأثير غير المباشر.

ومن خلال عمليات الجمع والتركيب المكاني الموزون عبر أداة تحليلية في برامج نظم المعلومات الجغرافية متوفرة في برمجيات (QGIS& ArcGIS) تستخدم لإجراء العمليات الحسابية والمنطقية على قيم الحقول داخل جدول السمات، بهدف إنشاء حقول جديدة أو تعديل القيم الموجودة اعتمادًا على معادلات رياضية أو تعبيرات شرطية ، يمكن بناء مؤشر مكاني مركب يوضح مناطق التوافق العالي بين كثافة السكان وارتفاع تراكيز (NO_2) ، بما يسهم في الكشف عن بؤر الخطر البيئي وعدم العدالة المكانية داخل المدينة خريطة (٣) . وعليه يوفر استخدام الجبر الخرائطي إطارًا علميًا ومنهجيًا لتحليل التفاعل بين الإنسان والبيئة، ويساعد في دعم قرارات التخطيط البيئي والصحي، من خلال تحديد الأولويات المكانية للتدخل وتقليل تعرض الفئات السكانية الأكثر هشاشة لمخاطر تلوث الهواء.

خريطة (٣) مستويات تعرض السكان لمخاطر تلوث الهواء بغاز NO_2 في مدينة الموصل



المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على تحليل الجبر الخرائطي باستخدام اداة (Raster Calculator)

٥- حساب مؤشر التعرض السكاني المرجح لغاز No_2 باستخدام "نموذج المتوسط المرجح سكانياً للتعرض البيئي

يعد مؤشر التعرض السكاني من الأدوات الأساسية في التحليل الجغرافي البيئي، إذ يتيح تقييم مستوى تعرض السكان للملوثات البيئية بصورة أكثر دقة من المؤشرات التقليدية التي تعتمد على التوزيع المكاني للملوث فقط. ويبرز دور نموذج المتوسط المرجح السكاني (Population-Weighted Exposure) في دمج البعدين المكاني والديموغرافي، من خلال إعطاء أوزان نسبية لمستويات التلوث بناءً على كثافة السكان في كل وحدة مكانية، تكمن أهمية هذا النموذج في كونه يعكس الواقع الفعلي للتعرض البشري، حيث لا تتساوى المناطق في تأثيرها على الصحة العامة، فالمناطق ذات الكثافة السكانية العالية تمثل أولوية أكبر في التقييم حتى وإن كانت مستويات التلوث فيها متوسطة. وبالتالي، يسهم هذا المؤشر في تحسين دقة التقدير المكاني للمخاطر البيئية، ودعم صناع القرار في توجيه السياسات البيئية والصحية نحو المناطق الأكثر تأثرًا، كما يُستخدم هذا النموذج على نطاق واسع في دراسات جودة الهواء، خاصة في تقييم التعرض لملوثات مثل ثاني أكسيد النتروجين (NO_2)، لما له من تأثيرات صحية مباشرة على الجهاز التنفسي، مما يجعله أداة فعالة في الربط بين الجغرافيا البيئية وجغرافية السكان . (Zhou & Knote, 2023)

والجدول (٢) يوضح مقاييس تراكز غاز (NO_2) حسب وحدة القياس (MOL/M^2) (مول / متر مربع) وهو يمثل كمية الغاز في عمود هوائي يمتد من سطح الارض الى أعلى الغلاف الجوي ، وتم تصنيفها إلى مستويات بيئية اربعة بهدف قياس التباين المكاني في شدة التعرض السكاني، وهذا يسمح بتحليل العلاقة بين توزيع السكان وأنماط التلوث ضمن إطار جغرافية المخاطر البيئية السكانية، وحساب مؤشر التعرض السكاني المرجح.

جدول (٢) تصنيف مستويات مخاطر تعرض سكان مدينة الموصل لتراكز غاز (NO_2) حسب وحدة القياس (MOL/M^2) لسنة ٢٠٢٥

ت	فئة التعرض للمخاطر السكانية	مستويات تراكيز غاز MOL/M^2 NO_2 C_i	التوصيف البيئي	عدد السكان p_i	% السكان المعرضين لمخاطر التلوث
١	هواء نقي	٠,٠٠٠٠٥>	هواء نظيف	٧١٦٨٠	%٤
٢	منخفض التلوث	٠,٠٠٠٠٥–٠,٠٠٠١٠	تلوث خفيف	٢١٥٠٤٠	%١٢
٣	هواء متوسط التلوث	٠,٠٠٠١٠ – ٠,٠٠٠٢٠	تلوث ملحوظ	٦٢٧٢٠٠	%٣٥
٤	هواء مرتفع التلوث	٠,٠٠٢٠ – ٠,٠٠٠٣٠	ضغط بيئي	٨٧٨٠٨٠	%٤٩

ملاحظة :سيتم اختيار قيم متوسطة للفئات Ci المكونات لتسهيل الحساب في معادلة التعرض السكاني المرجح

يظهر التحليل المقارن بين بيانات الجدول (٢) والمخرجات المكانية لـ الخريطة (٣) أن ما يقرب من نصف سكان المدينة (٤٩%) يتركزون في مناطق ذات مستويات تعرض "مرتفعة" او الضغط البيئي، ويشير هذا بوضوح إلى أن شريحة واسعة من سكان مدينة الموصل تقطن ضمن نطاقات الضغط البيئي، وتحديداً في قلب المجال الحضري الملوث.

وفي المقابل، نجد أن ٣٥% من السكان يقعون ضمن مستويات تعرض "متوسطة" او تلوث الملحوظ، مما يعكس اتساع الرقعة الجغرافية للمخاطر البيئية وعدم انحصارها في نطاق ضيق او بؤر حيث باتت تشمل أكثر من ثلث السكان. هذا التداخل المكاني المعقد بين الكثافة السكانية ومصادر الانبعاثات يطرح إشكالية جوهرية تتعلق بـ "العدالة البيئية" وضرورة إعادة توزيع المراكز السكانية.

أما فيما يخص النسب المنخفضة، فقد سجلت المرتبة الأولى نسبة ٤% هواء نقي او هواء نظيف و١٢% منخفض التلوث او تلوث خفيف، وتتركز هذه النسب غالباً في المناطق ذات الكثافة السكانية المنخفضة، أو المناطق الغنية بالغطاء النباتي، وكذلك في الأطراف وحافات المدينة أو على ضفاف مؤشر المياه السطحية المتمثل في نهر دجلة.

ويمكن حساب مؤشر التعرض السكاني المرجح لغاز(No_2) باستخدام "نموذج المتوسط المرجح سكانياً للتعرض البيئي ويدرس هذا المؤشر العلاقة البيئية بين السكان والمكان وهى معتمدة من قبل

منظمة الصحة العالمية ومراكز الابحاث العدالة البيئية في الولايات المتحدة الامريكية ودول اوربية وفق المعادلة (Clark,L.P, Millet,D.B, & Marshall,J.D, 2014) :-

$$pwe = \sum(Ci \times pi) \div \sum Pi$$

PWE= **التعرض** السكاني المرجح

P_i = عدد السكان في الوحدة المكانية او لكل فئة

Ci = تركيز الملوث (نسبة التركز لغاز NO_2) في الوحدة المكانية او لكل فئة

$\sum Pi$ = مجموع السكان الكلي في منطقة الدراسة

تطبيق المعادلة :-

اولاً: عدد السكان حسب كل فئة p_i	ثانياً: قيم التركز للتلوث Ci (نأخذ المتوسط الفئات)
الفئة الاولى ١: ٧١٦٨٠ نسمة	الفئة الاولى ١: ٠,٠٠٠٠٥ (MOL/M^2)
الفئة الثانية ٢: ٢١٥٠٤٠ نسمة	الفئة الثانية ٢: ٠,٠٠٠٠٧٥ (MOL/M^2)
الفئة الثالثة ٣: ٦٢٧٢٠٠ نسمة	الفئة الثالثة ٣: ٠,٠٠٠١٥ (MOL/M^2)
الفئة الرابعة ٤: ٨٧٨٠٨٠ نسمة	الفئة الرابعة ٤: ٠,٠٠٠٢٥ (MOL/M^2)

ثانياً:- حساب $p_i * c_i$

٧١٦٨٠ * ٠,٠٠٠٠٥ = ٣,٥٨٤ (MOL/M^2)

٢١٥٠٤٠ * ٠,٠٠٠٠٧٥ = ١٦,١٢٨ (MOL/M^2)

٦٢٧٢٠٠ * ٠,٠٠٠١٥ = ٩٤,٠٨ (MOL/M^2)

٨٧٨٠٨٠ * ٠,٠٠٠٢٥ = ٢١٩,٥٢ (MOL/M^2)

ثالثاً :- جمع تراكيز التلوث بغاز NO_2 لكل الفئات وتقسيمها على مجموع السكان في كل الفئات

٣٣٣,٣١٢ (MOL/M^2) = ٢١٩,٥٢ + ٩٤,٠٨+١٦,١٢٨+٣,٥٤٨ لكل الفئات

١٧٩٢,٠٠٠ نسمة لكل الفئات = ٨٧٨٠٨٠+٦٢٧٢٠٠+٢١٥٠٤٠+٧١٦٨٠

رابعاً :- حساب قيمة PWE

٣٣٣,٣١٢ (MOL/M^2) / ١٧٩٢,٠٠٠ نسمة = ٠,٠٠٠١٨٦ (MOL/M^2) لكل نسمة

وتشير هذه القيمة المعيارية إلى أن متوسط التعرض الفعلي لسكان المدينة بغاز (NO_2) يقع بين فئتي التلوث الملحوظ (٠,٠٠٠١٠ – ٠,٠٠٠٢٠) وضغط بيئي مرتفع (٠,٠٠٠٢٠ – ٠,٠٠٠٣٠)، مما يعكس أن أغلب سكان الموصل معرضون لتلوث متوسط إلى مرتفع او التلوث الملحوظ والضغط البيئي. ويؤكد التحليل المكاني أن مناطق الكثافة السكانية تتقاطع مع المناطق التي تعاني من مستويات مرتفعة من التلوث، وهو ما يدل على وجود ضغط بيئي حضري مرتبط بالكثافة السكانية والنشاط العمراني، يبرز هذا التقييم أهمية استخدام المعادلات المرجحة بعدد السكان لتقدير المخاطر البيئية، إذ أنها توفر صورة أكثر دقة عن التعرض الفعلي للمجتمع البشري مقارنة بالاعتماد على قيم التركيز وحدها، وقد كشفت هذه الدراسة أن العلاقة بين الكثافة السكانية وتركيز غاز (NO_2) في مدينة الموصل ليست مجرد تزامن مكاني، بل هي تعبير عن تفاعل جدلي بين الإنسان والمجال البيئي الحضري، فالسكان ليسوا فقط متلقين للخطر البيئي، بل فاعلين في إنتاجه وإعادة توزيعه، ان قيمة مؤشر (PWE) يعكس عبئًا ديموغرافيًا حقيقيًا يهدد استدامة النمو الحضري، ويستدعي إعادة صياغة التخطيط المكاني وفق منطق العدالة البيئية السكانية، التي تعنى برفع مستوى جودة الحياة للسكان .

أولاً– الاستنتاجات

١– أثبتت النتائج أن غاز(NO_2) لا يتوزع عشوائيًا، بل يتطابق مع التوزيع المكاني للكثافات السكانية، مما يعني أن التلوث أصبح عنصرًا بنيويًا في تشكيل المجال الحيوي للسكان داخل المدينة، وهذا يحول التلوث من متغير بيئي إلى عامل مؤثر في جودة الحياة والاستقرار السكاني.

٢– التعرض ليس مكانيًا فقط بل ديموغرافيًا ،ان قيمة(PWE) المستخرجة تكشف أن الخطر لا يخص المساحة بل يخص "الكتلة السكانية المعرضة" وبالتالي فإن المدينة تشهد تركيزًا ديموغرافيًا للمخاطر وليس مجرد تركّز بيئي.

٣- ارتفاع الكثافة في مناطق محددة، أدى إلى تضخم انبعاثات النقل وارتفاع الطلب على الطاقة الكهربائية (المولدات الاهلية) مع تقليص المساحات الخضراء أي أن الكثافة ليست ضحية فقط، بل عامل مساهم في إنتاج الخطر البيئي.

٤- العلاقة بين الغطاء النباتي والصحة السكانية فالمناطق الغطاء النباتي المستخرج لمؤشر(NDVI) المرتفع لا تمثل فقط بيئة أنظف، بل توفر جودة حياة أفضل ، وتقلل العبء الصحي المتوقع ، والمحافظة على التوازن السكاني المستدام.

ثانياً- المقترحات

١- اعتماد مؤشر التعرض المرجّح سكانيًا كأداة تخطيطية ، يجب أن تصبح قيمة التعرض السكاني جزءًا من معايير الترخيص العمراني شرطًا في إنشاء المدارس والمستشفيات وأداة لتحديد أولويات التدخل. وحماية الفئات السكانية.

2- تحديد الفئات الأكثر تعرضًا وهم الأطفال وكبار السن والسكان ذوو الأمراض التنفسية وربط خرائط التعرض بخطط الرعاية الصحية في الدراسات المستقبلية والتوسع .

3-تحقيق العدالة البيئية السكانية من خلال تقليل الفجوة بين الأحياء بتوزيع متوازن للمساحات الخضراء

لمنع تمركز مصادر الانبعاث قرب الأحياء المكتظة.

٤-زيادة المساحات الرطبة ضمن مناطق التلوث من خلال انشاء الحدائق والنفورات المائية للتخلص من سحب الغبار الأوزون الارضي الناتج من الغاز(NO_2) .

٥-ضرورة الاخذ بالتصاميم العمرانية الحديثة التي تراعي حركة الهواء في الشوارع للتخلص مما يعرف بظاهرة "أودية التلوث"

٦-ضرورة دمج تقنيات الاستشعار عن بعد مع سياسات التخطيط الحضري والبيئي، للحد من مصادر التلوث ورصدها لتحسين جودة الهواء، وتعزيز الاستدامة البيئية والحضرية لسكان المدن.

المصادر المعتمدة في البحث :-

اولاً :- المصادر العربية

١- الخياط .امنه باسل محمد. (٢٠٢١). *دراسة تلوث الهواء بالجسيمات الدقيقة في مناطق مختارة من مدينة الموصل*. الموصل: جامعة الموصل كلية العلوم البيئة وتقاناتها .

٢- جمهورية العراق وزارة التخطيط. (٢٠٢٤). *الاحصائيات حسب التعداد السكاني*. بغداد: وزارة التخطيط العراقية.

٣- الراوي .ساطع. (٢٠٠٦). مولدات الكهرباء ومخاطر البيئة. *مجلة مناهل جامعية*.

٤- علي .صباح حسين ، و حبو. داؤد محمد. (٢٠١١). دراسة تأثير مواقع مولدات الديزل على التغير المناخي المحلي لمدينة الموصل باستخدام نظم المعلومات الجغرافية . *مجلة التربية والعلم* .

٥- العجيلي .محمد صالح ربيع. (١٩٩٦). مخاطر التلوث في مدينة بغداد دراسة في جغرافية المدن . *مجلة الجمعية الجغرافية العراقية* .

٦- الظاهر. نعيم ابراهيم. (٢٠٠١). تلوث الهواء وادارة البيئة في الاردن . *مجلة البحوث الجغرافية* .

ثانياً :- المصادر باللغة الانكليزية

1- Acker, S., Holloway, T., & Harkey, M. (2025, JUL 31). Satellite detection of NO2 distributions using TROPOMI and TEMPO and comparison with ground-based concentration measurements. *European Gosciences Union*, pp. 205-231.

2- Bzdziuch, P., Bogack, M., & Oleniacz, R. (2024, December 6). Street Canyon Vegetation—Impact on the Dispersion of Air Pollutant Emissions from Road Traffic. *Journals Sutainabilty*, pp. 175-204.

3- Clark , L,P., Millet,D.B, & & Marshall,j.d. (2014, Aprier 15). National patterns in environmental injustice and inequality: Outdoor NO_2 air pollution in the United States. *PLOS ONE*, p. e94431.

4- Hoy, A., Mohan, G., & Nolan, A. (2025, November 20). Investigating inequalities in NO2 air pollution concentrations on novel indicators relating to small spatial areas. *International Journal for Equity in Health*, pp. 211-225.

5- Jimenez, J. R., Viloria, A. D., & Brovelli, M. A. (2023, March 4). Estimating Daily NO2 Ground Level Concentrations Using Sentinel-5P and Ground Sensor Meteorological Measurements. *ISPRS Int.Geo-Inf*, pp. 139-171.

6- Landritgan. (2018, February 3). Pollution and health. *The Lancet*, pp. 462-512.

7- Santos, D. G., & Pares, M. E. (2025, OCT 21). Assessing nitrogen dioxide monitoring techniques: a comparative analysis of Sentinel-5 Precursor satellite and ground measurements in Catalonia. *Europan Geosciences Union*, pp. 48-71.

8- van Geffen, J., Boersma, K. F, & Eskes, H. (2020, March 23). S5P/TROPOMI NO_2 slant column retrieval: method, stability, uncertainties and comparisons with OMI. . **Atmospheric Measurement Techniques*, pp. 1335-1315.

9- Wang, G., Peng, W., & Zhang, L. (2023, May 27). Estimate of population density and diagnosis of main factors of . *journal homepage*, pp. 1-18.
10- Word Health Organization. (2013). *Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP Project: Technical Report [Internet]*. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe.

11- WU, C., ELdoesok, A. H., & Morello, E. (2025, February 11). Street Canyon Vegetation—Impact on the Dispersion of Air Pollutant Emissions from Road Traffic. *Landscape and Urban Planning*, pp. 257-272.
12- Zhou,B., & Knote,C. (2023,July 18) An estimate of excess mortality resulting form air pollution caused wildfires in eastern and central Mediterranean basin in 2021.Natural Hazards and Earth System Sciences (NHESS) ,Copernicus,pp1-44
13- Al-Khayyat, Amna Basil Mohammed. (2021). A study of air pollution by fine particulate matter in selected areas of Mosul. Mosul: University of Mosul, College of Environmental Sciences and Technologies
14- Republic of Iraq, Ministry of Planning. (2024). Statistics by Population Census. Baghdad: Iraqi Ministry of Planning.
15- Al-Rawi, Sateh (2006). Electricity Generators and Environmental Hazards. Manahil University Journal.
16- Ali Sabah Hussein, and Habo Daoud Mohammed. (2011). A study of the impact of diesel generator locations on local climate change in Mosul using Geographic Information Systems. Journal of Education and Science.
17- Al-Ajili, Muhammad Saleh Rabie. (1996). Pollution Risks in Baghdad: A Study in Urban Geography. Journal of the Iraqi Geographical Society.
18- Al-Zaher, Naeem Ibrahim. (2001). Air Pollution and Environmental Management in Jordan. Journal of Geographical Research.

الملحق (١) امسح الرمز واطلع على كود البرمجي للبحث