Journal of Al-Farahidi's Arts, No Conference (10 th)N(I)239-261
Doi: https://doi.org/10.25130/jfa.conf.10.1.11

Proceedings of the (10) Conference وقائع المؤتمر العلمي العاشر

P-ISSN : 2074-9554 | E-ISSN: 2663-811
Journal of Al-Farahidi's Arts
available online at : fja.tu.edu.iq/index.php/fja

Tikrit University J.F.A Journal of Al-Frahedis

Modeling Environmental Pollution Maps in the Erbil Plain Using Remote Sensing and Geospatial Artificial Intelligence (GeoAI)

Asst. Prof. Dr. Faeq Hassan Muheimid

E-Mail: Faaqhassan@tu.edu.iq

Keywords:
Erbil Plain, Environmental Pollution
, Remote Sensing, GeoAI, NDVI, LST, NDBI, SO

Article history:

Received	19/9/2025
Received in revised form	27/9/2025
Accepted	19/10/2025
Available online	9/12/2025

E-mail Jaa@ tu.edu.iq

©THIS AN OPEN ACCESS ARTICLE UNDER THE CCBY LICENSE
http:// creativecommons.org/licenses/by/4.0

A B S T R A C T

This study aims to analyze the spatial distribution of environmental pollution in the Erbil Plain using remote sensing data and Geospatial Artificial Intelligence (GeoAI) techniques. Satellite imagery from Landsat and Sentinel was utilized to calculate key environmental indicators representing different ecosystem components, including the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Land Surface Temperature (LST), and Normalized Difference Built-up Index (NDBI), as well as Sentinel-5P data for air pollutants such as sulfur dioxide (SO_2). Several GeoAI and spatial analysis methods were applied, including the Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM), and Artificial Neural Network (ANN) algorithms, to classify pollution-affected areas and predict future patterns. The results revealed that integrating remote sensing with GeoAI significantly enhanced the accuracy of spatial pollution mapping, identifying high-pollution zones concentrated within urban and industrial centers of Erbil, whereas rural and vegetated areas showed lower pollution levels. The study recommends adopting smart environmental monitoring systems based on GeoAI technologies to support sustainable resource management and evidence-based environmental planning.

نمذجة خرائط التلوث البيئي في سهل أربيل باستخدام الاستشعار عن بعد وتقنيات الذكاء الاصطناعي الجغرافي (GeoAI)

أ.م. د. فائق حسن محيميد /جامعة تكريت/ كلية الآداب/ قسم الجغرافية ونظم المعلومات الجغرافية

المستخلص:

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل التوزيع المكاني للتلوث البيئي في سهل أربيل باستخدام بيانات الاستشعار عن بعد وتقنيات الذكاء الاصطناعي الجغرافي (GeoAI). اعتمدت الدراسة على صور الأقمار الصناعية (Landsat و Sentinel) لحساب مؤشرات بيئية رئيسية تمثل مكونات النظام البيئي مثل مؤشر الغطاء النباتي المعياري (NDVI) ومؤشر حرارة سطح الأرض (LST) ومؤشر الكثافة العمرانية (NDBI)، فضلاً عن بيانات القمر الصناعي (Sentinel-5P) الخاصة بتركيز الغازات الملوثة مثل ثاني أوكسيد الكبريت (SO_2). استخدمت الدراسة مجموعة من أدوات التحليل المكاني والذكاء الاصطناعي الجغرافي مثل خوارزمية الغابات العشوائية (Random Forest) وخوارزمية دعم الآلات المتجهة (SVM) والشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) لتصنيف المناطق الملوثة والتنبؤ بالأنماط المستقبلية للتلوث. أظهرت النتائج أن دمج بيانات الاستشعار عن بعد مع تقنيات الذكاء الاصطناعي أسهم في إنتاج خرائط مكانية دقيقة توضّح بؤر التلوث البيئي في مركز مدينة أربيل، خاصة في المناطق الصناعية والحضرية، مقابل انخفاض واضح في الأطراف الزراعية والطبيعية. وتوصي الدراسة بتبني نظم مراقبة بيئية ذكية تعتمد على تقنيات GeoAI في متابعة التغيرات البيئية والتخطيط المستدام للموارد الطبيعية.

الكلمات المفتاحية : سهل أربيل، التلوث البيئي، الاستشعار عن بعد، الذكاء الاصطناعي الجغرافي.

المقدمة:

يُعد التلوث البيئي من أبرز التحديات التي تواجه البيئات الحضرية والزراعية في العراق لما يتركه من آثار سلبية على صحة الإنسان واستدامة الموارد الطبيعية. ومع التوسع العمراني والصناعي غير المنظم، خاصة في سهل أربيل، ظهرت مشكلات بيئية متزايدة تمثلت في تدهور الغطاء النباتي وارتفاع درجات حرارة السطح وتلوث الهواء والمياه، مما يستدعي دراسة علمية لتحديد مواقع التلوث وأنماطه المكانية.

تُعد تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية (GIS) من الأدوات الفاعلة في رصد وتحليل الظواهر البيئية، إلا أن دمجها مع تقنيات الذكاء الاصطناعي الجغرافي (GeoAI)أتاح فرصًا متقدمة لبناء نماذج تنبؤية تُسهم في تفسير العلاقات المكانية والتنبؤ بالتغيرات المستقبلية.

يهدف هذا البحث إلى توظيف بيانات الأقمار الصناعية Landsatو Sentinelوالمؤشرات البيئية مثل NDVIو LSTوNDBI، إضافة إلى بيانات الملوثات الغازية من القمر الصناعي Sentinel-5P، لإنتاج خرائط دقيقة توضّح التوزيع الجغرافي للتلوث البيئي في سهل أربيل. كما يعتمد البحث على أدوات التحليل المكاني وخوارزميات الذكاء الاصطناعي مثل Random Forestو Artificial Neural Networksللمساهمة في دعم اتخاذ القرار البيئي وتحقيق التنمية المستدامة في المنطقة المدروسة.

أولا: مشكلة البحث

1) ما حجم تأثير التوسع العمراني على التلوث البيئي في سهل أربيل؟
2) كيف انعكس النشاط الصناعي والزراعي على صحة الغطاء النباتي والمياه؟
3) ما مدى إمكانية استخدام مؤشرات الاستشعار عن بعد (NDVI, LST, NDBI) في رصد التلوث البيئي؟
4) هل يمكن تحديد البؤر الساخنة للتلوث في سهل أربيل باستخدام التحليل المكاني (Hotspot Analysis)؟
5) إلى أي مدى تسهم تقنيات الذكاء الاصطناعي الجغرافي (GeoAI) في بناء نماذج تنبؤية للتلوث المستقبلي؟

ثانيا: فرضيات البحث

1) التوسع العمراني في سهل أربيل أدى إلى زيادة مستويات التلوث البيئي بشكل ملحوظ.
2) الأنشطة الصناعية والزراعية غير المنظمة ساهمت في تدهور الغطاء النباتي وتلوث مصادر المياه.
3) مؤشرات الاستشعار عن بعد مثل NDVI و LSTو NDBIقادرة على رصد التغيرات البيئية المرتبطة بالتلوث بدقة مقبولة.
4) يمكن للتحليل المكاني (Hotspot Analysis) تحديد مناطق التركّز الأعلى للتلوث وتمييزها عن المناطق الأقل تلوثاً.
5) دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي الجغرافي (GeoAI) مع بيانات الاستشعار عن بعد سيمكن من بناء نماذج تنبؤية دقيقة للتلوث المستقبلي.

ثالثا: أهمية البحث

1) يساهم في توفير خرائط مكانية دقيقة توضّح التوزيع الحالي للتلوث في سهل أربيل.
2) يدمج بين الاستشعار عن بعد والذكاء الاصطناعي الجغرافي (GeoAI) كأدوات حديثة في دراسة التلوث البيئي.
3) يساعد صُنّاع القرار في تحديد المناطق الأكثر تلوثاً (Hotspots)ووضع خطط لمعالجتها.
4) يقدم نماذج تنبؤية مستقبلية يمكن الاعتماد عليها في التخطيط الحضري والبيئي.
5) يدعم جهود التنمية المستدامة وحماية الموارد الطبيعية والغطاء النباتي.
6) يساهم في الحد من المخاطر الصحية والبيئية على السكان المحليين.

رابعا: أهداف البحث

يهدف البحث إلى تحقيق ما يأتي:

1) تحليل التغيرات البيئية في سهل أربيل باستخدام بيانات الأقمار الصناعية (Landsat و Sentinel).
2) إعداد خرائط مكانية توضّح مؤشرات الغطاء النباتي وحرارة السطح والكثافة العمرانية.
3) تحديد البؤر الساخنة للتلوث البيئي من خلال التحليل المكاني.(Hotspot Analysis)

4) توظيف خوارزميات الذكاء الاصطناعي الجغرافي (Random Forest و ANN) لبناء نموذج تنبؤي للتلوث.

5) تقديم نتائج تساعد صُنّاع القرار في وضع خطط بيئية مستدامة للحد من التلوث وحماية الموارد الطبيعية.

خامسا: منهجية البحث:

اعتمد البحث على المنهج الوصفي التحليلي في دراسة ظاهرة التلوث البيئي في سهل أربيل من خلال جمع البيانات المكانية والزمانية من صور الأقمار الصناعية وتحليلها لتوصيف الواقع البيئي. كما تم استخدام المنهج الكمي بحساب المؤشرات البيئية مثل NDVI وLST و NDBI وتحليلها إحصائيًا لقياس مستويات التلوث. إضافة إلى ذلك، طُبّق المنهج الاستنباطي التنبؤي ببناء نماذج ذكية باستخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي (ANN و Deep Learning) لاستشراف التوزيع المستقبلي للتلوث. وبذلك جمع البحث بين الوصف والتحليل الكمي والتنبؤ المكاني لتحقيق فهم شامل للظاهرة.

سادسًا: الأدوات المستخدمة في البحث :

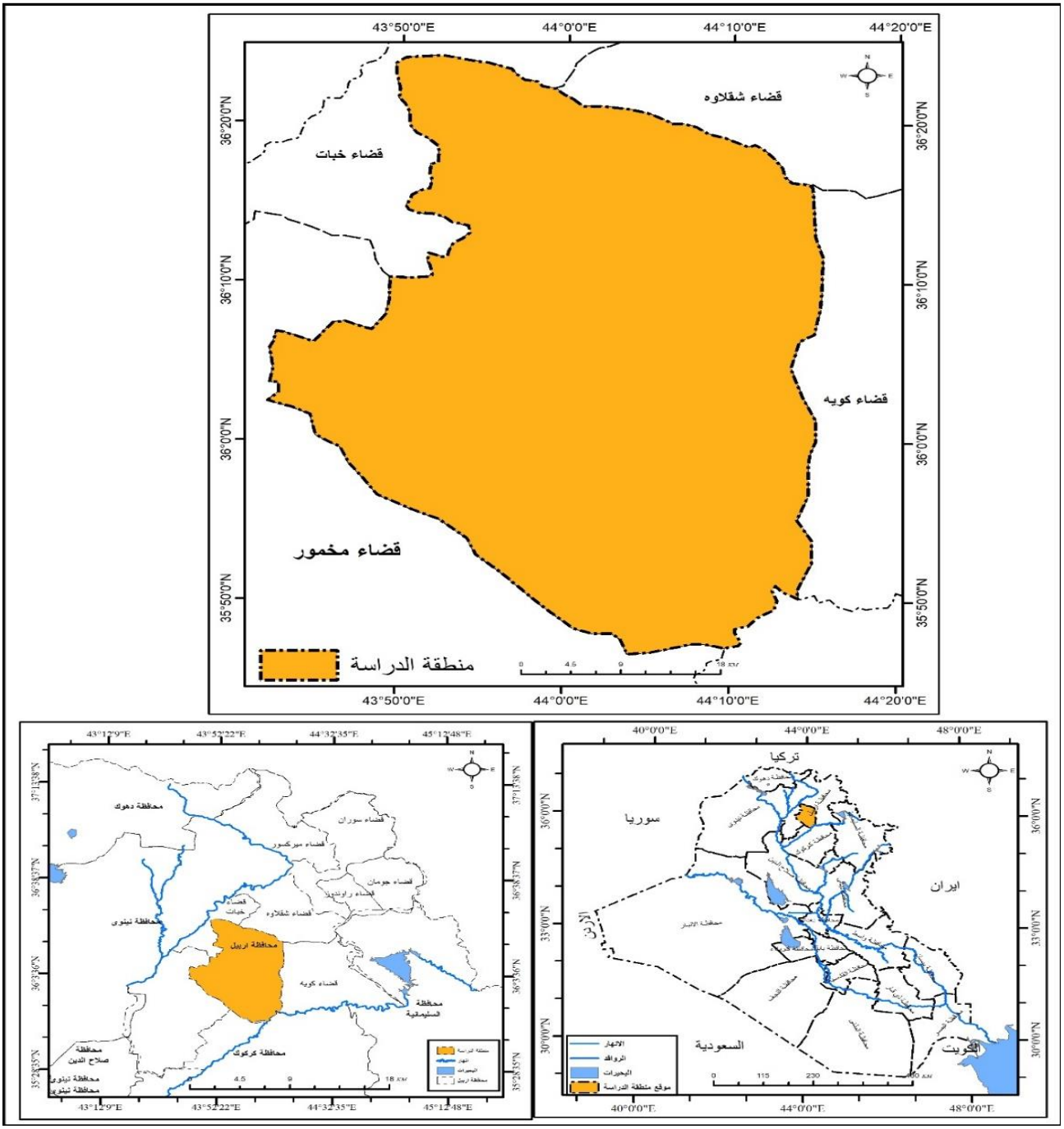
اعتمد البحث على صور الأقمار الصناعية Landsat وSentinel-2 وSentinel-5P، وبرامج ArcGIS Pro، ، إضافةً إلى بيئة Python لتطبيق خوارزميات الذكاء الاصطناعي.استُخدمت مؤشرات NDVI، LST، NDBI، SO_2 لتحليل التغيرات البيئية، مع توظيف أساليب التحليل المكاني والبؤر الساخنة (Hotspot Analysis) والشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) للكشف عن مناطق التلوث والتنبؤ بها.

سابعا: موقع منطقة الدراسة

يُعدّ قضاء أربيل من أهم الأقضية في إقليم كردستان العراق، ويشكّل المركز الإداري لمحافظة أربيل، فضلاً عن كونه أحد أقدم وأبرز المراكز الحضرية في العراق. يتركز مكانيا في الجزء الجنوبي من محافظة أربيل شمالي العراق، وتحدّه من الشمال قضاء شقلاوة، ومن الشرق قضاء كويه، ومن الغرب قضاء خبات، ومن الجنوب قضاء مخمور، ويمتد القضاء فلكياً بين خطي طول (43°42'06" – 44°15'25")شرقاً، وبين دائرتي عرض ("35°46'49 – "36°24'12) شمالاً. وتبلغ مساحة القضاء حوالي 2246.29كيلومتر مربع، ويظهر موقعه بوضوح في

الخريطة (1)، اما بالنسبة للحدود الإدارية يحدّه من الشمال قضاء شـــقلاوة ومـــن الجنـــوب محافظة كركوك ومن الشرق :قضاء كويسنجق، وقضاء سوران الغـــرب :قضـــاء مخمـــور وبعض المناطق التابعة لمحافظة نينوى .

خريطة (1) موقع منطقة الدراسة



المصدر : بالاعتماد على الخريطة الإدارية للعراق بمقياس رسم 1000000/1 وخريطة محافظة أربيل بمقياس رسم 500000/1 وخريطة منطقة الدراسة بمقياس رسم 100000/1 وبرنامج ArcGIS10.8

أولا: مفهوم التلوث البيئي:

التلوث البيئي يُعد من أبرز التحديات التي تواجه العالم اليوم، إذ يمثل الخلل الذي يحدث في عناصر البيئة الطبيعية من هواء وماء وتربة نتيجة الأنشطة البشرية أو العوامل الطبيعية. ويظهر التلوث في صور متعددة، تشمل تلوث الهواء الناتج عن الانبعاثات الغازية والملوثات الدقيقة الصادرة من المصانع ووسائل النقل والأنشطة العمرانية، إضافة إلى تلوث الماء الناجم عن تصريف المخلفات الصناعية والزراعية والمياه الثقيلة إلى الأنهار والبحيرات والبحار، مما يؤدي إلى تدهور نوعية المياه وتراجع التنوع البيولوجي(مهدي، 2022، ص 225). يتجلى التلوث البيئي في تدهور التربة والهواء والمياه نتيجة النشاطات البشرية غير المنظمة، كالاستخدام المفرط للأسمدة والوقود الأحفوري وسوء إدارة النفايات. وتتسبب هذه الملوثات بأضرار صحية وبيئية خطيرة، أهمها أمراض الجهاز التنفسي وفقدان التنوع الأحيائي. ويُعد التلوث تحديًا عالميًا يستلزم الاعتماد على الطاقة المتجددة، وتشديد القوانين البيئية، ورفع الوعي المجتمعي لضمان بيئة آمنة ومستدامة.

ثانياً: مؤشرات التلوث

اعتمد البحث على مجموعة من المؤشرات البيئية المستخرجة من صور الأقمار الصناعية لرصد التلوث البيئي في منطقة الدراسة. تم حساب مؤشر الغطاء النباتي المعياري (NDVI) لتقييم حالة الغطاء النباتي، ودرجة حرارة سطح الأرض (LST) للكشف عن الجزر الحرارية الناتجة عن النشاط الصناعي والحضري، ومؤشر الكثافة العمرانية (NDBI) لقياس التوسع العمراني، ومؤشر المياه (NDWI) لتقدير وفرة المياه السطحية، إضافة إلى مؤشر التربة الجرداء (BSI) لتحديد المناطق المتدهورة.

كما تم تحليل بيانات القمر الصناعي Sentinel-5P الخاصة بتركيز الغازات الملوثة مثل SO_2 وNO_2 و CO لرصد التلوث الهوائي بدقة. جرى استخراج وتحليل هذه المؤشرات باستخدام برامج ArcGIS Pro و QGIS و ENVI بعد التصحيح الإشعاعي والجغرافي للصور الفضائية، بهدف تحديد التغيرات البيئية في سهل أربيل.

1) **مؤشر الغطاء النباتي المعياري:(NDVI)**

تم حسابه بالاعتماد على الحزمة الحمراء (Red) والحزمة تحت الحمراء القريبة (NIR)من صور الأقمار الصناعية. يستخدم هذا المؤشر في قياس صحة وكثافة

الغطاء النباتي، إذ أن انخفاض قيمه يدل على تدهور النباتات نتيجة التلوث الهوائي أو التوسع العمراني(Adduri, S. D., and T. A. Ali, 1, 2025, p. 48) .

مؤشر الغطاء النباتي المعياري:(NDVI)

الصيغة: (NIR – Red) / (NIR + Red)

الخوارزمية: معادلة طيفية.(Band Ratio)

الهدف: قياس صحة وكثافة الغطاء النباتي.

العلاقة بالتلوث: انخفاض قيم NDVI يدل على تدهور الغطاء النباتي نتيجة التلوث أو التوسع العمراني.

2) **درجة حرارة سطح الأرض:(LST)**

استُخرجت من الحزم الحرارية (Thermal Bands) في صور Landsat و Sentinel. ارتفاع قيم LST يشير إلى وجود الجزر الحرارية الحضرية الناتجة عن التوسع العمراني والأنشطة الصناعية، والتي ترتبط بزيادة التلوث

الصيغة: $LST = BT / (1 + (\lambda \times BT / \rho) \ln(\varepsilon))$، حيث BT درجة الحرارة الساطعة المستخرجة من الحزم الحرارية (Alvarez, C. I., A. Rowley, and F. 4, 2024, p. 315) .

الخوارزمية Planck :مع تصحيح إشعاعي وحساب معامل الانبعاثية.

الهدف: قياس حرارة سطح الأرض.

العلاقة بالتلوث: ارتفاع قيم LST يعكس الجزر الحرارية الناتجة عن الأنشطة العمرانية والصناعية.

3) **مؤشر الكثافة العمرانية:(NDBI)**

يعتمد على الحزمة تحت الحمراء القريبة (NIR) والحزمة تحت الحمراء القصيرة (SWIR).يُستخدم للكشف عن المناطق المبنية والعمرانية، حيث تعكس القيم العالية توسعاً عمرانياً يرتبط بزيادة مصادر التلوث.

الصيغة: (SWIR – NIR) / (SWIR + NIR)

الخوارزمية: معادلة طيفية.(Band Ratio)

الهدف: تحديد المناطق المبنية والعمرانية.

العلاقة بالتلوث: القيم العالية تشير إلى توسع عمراني يقترن بزيادة مصادر التلوث.

4) **مؤشر المياه المعياري:(NDWI)**

تم حسابه باستخدام الحزمة الخضراء (Green) والحزمة تحت الحمراء القريبة (NIR).يساعد هذا المؤشر في تحديد المياه السطحية ورصد أي تراجع في كميتها أو تغير في نوعيتها قد يكون مرتبطاً بالتلوث أو الاستغلال المفرط.

الصيغة: (Green – NIR) / (Green + NIR).

الخوارزمية: معادلة طيفية.(Band Ratio)

الهدف: الكشف عن المياه السطحية ورصد رطوبة البيئة.

العلاقة بالتلوث: انخفاض القيم يعكس شحة أو تلوث المياه.

5) **مؤشر التربة الجرداء:(BSI)**

تم حسابه من خلال دمج الحزمة تحت الحمراء القريبة (NIR) والحزمة تحت الحمراء القصيرة (SWIR) والحزمة الحمراء (Red) والحزمة الزرقاء .(Blue) يوضح هذا المؤشر المناطق الفقيرة بالغطاء النباتي والمعرضة للتدهور، مما يجعلها أكثر حساسية للتلوث.

الصيغة: (SWIR + Red – NIR + Blue) / (SWIR + Red + NIR + Blue).

الخوارزمية: معادلة طيفية مركبة.(Band Combination)

الهدف: الكشف عن الأراضي الجرداء والتربة المتدهورة.

العلاقة بالتلوث: ارتفاع القيم يدل على مناطق معرضة للتدهور والتلوث.

6) **مؤشرات الغازات:(SO_2, NO_2, CO)**

تم الحصول عليها من بيانات القمر الصناعيSentinel-5P ، والتي توفر قياسات دقيقة لتركيز الملوثات الغازية في الغلاف الجوي. ارتفاع القيم يعكس مستويات عالية من تلوث الهواء التي تؤثر بشكل مباشر على صحة الإنسان والبيئة.

الصيغة: تُستخرج من بيانات القمر الصناعي Sentinel-5P باستخدام تقنيات الاستشعار الطيفي.

الخوارزمية.(Differential Optical Absorption Spectroscopy) DOAS :

الهدف: قياس مباشر لتركيز الملوثات الغازية.

العلاقة بالتلوث: ارتفاع تركيز الغازات يعكس مستويات خطيرة من تلوث الهواء تؤثر على صحة الإنسان والبيئة.

جدول (1) المرتبة للمؤشرات البيئية

المؤشر	المعادلة	الغرض	العلاقة بالتلوث	المصدر (القمر/المستشعر)	الحزم الطيفية (Bands)
مؤشر الغطاء النباتي المعياري (NDVI)	(NIR − Red) / (NIR + Red)	قياس صحة وكثافة الغطاء النباتي	انخفاض قيم NDVI يدل على تدهور الغطاء النباتي نتيجة التلوث أو التوسع العمراني.	Landsat (TM/ETM+/OLI), Sentinel-2 (MSI)	NIR, Red
درجة حرارة سطح الأرض (LST)	LST = BT / (1 + (λ × BT / ρ) ln(ε))	قياس حرارة سطح الأرض	ارتفاع قيم LST يعكس ظاهرة الجزر الحرارية الناتجة عن الأنشطة العمرانية والصناعية.	Landsat (TIRS: L8/L9, Thermal: L5/L7), MODIS (اختياري)	Thermal Infrared Bands (TIRS)
مؤشر الكثافة العمرانية (NDBI)	(SWIR − NIR) / (SWIR + NIR)	الكشف عن المناطق المبنية والعمرانية	القيم العالية لمؤشر NDBI تشير إلى توسع عمراني يقترن بزيادة مصادر التلوث.	Landsat (OLI), Sentinel-2 (MSI)	SWIR, NIR
مؤشر المياه المعياري (NDWI)	(Green − NIR) / (Green + NIR)	الكشف عن المياه السطحية ورطوبة البيئة	انخفاض قيم NDWI يعكس شحة أو تلوث المياه السطحية.	Landsat (OLI), Sentinel-2 (MSI)	Green, NIR
مؤشر التربة الجرداء (BSI)	(SWIR + Red − NIR + Blue) / (SWIR + Red + NIR + Blue)	كشف الأراضي الجرداء والتربة المتدهورة	ارتفاع قيم BSI يدل على أراضٍ جرداء معرضة للتدهور والتلوث.	Landsat (TM/ETM+/OLI), Sentinel-2 (MSI)	SWIR, Red, NIR, Blue
مؤشرات الغازات (SO_2, NO_2,)	Sentinel-5P / DOAS Algorithm	قياس مباشر لتركيز	ارتفاع تركيز الغازات يعكس مستويات خطيرة من تلوث	Sentinel-5P (TROPOMI)	UV-VIS-طيفNIR (

CO)		الملوثات الغازية في الهواء	الهواء تؤثر على صحة الإنسان والبيئة.		الامتصاص الطيفي للغازات(

المصدر :إعداد الباحث بالاعتماد على:

Rouse et al. (1974); Zha et al. (2003); McFeeters (1996); Weng et al. (2004); Rikimaru et al. (2002); Veefkind et al. (2012).

اعتمد البحث على مجموعة من المؤشرات البيئية المستخرجة من صور الأقمار الصناعية لرصد التغيرات البيئية وتحديد مظاهر التلوث في منطقة الدراسة. وقد جرى اختيار هذه المؤشرات لكونها شائعة الاستخدام في الدراسات الجغرافية والبيئية، إذ توفر صورة دقيقة عن حالة الغطاء النباتي، والمياه، والتربة، والعمران، فضلاً عن الملوثات الغازية في الغلاف الجوي.

يُعد مؤشر الغطاء النباتي المعياري (NDVI) من أهم المؤشرات في تقييم صحة وكثافة الغطاء النباتي، حيث يُحسب من الحزم الحمراء وتحت الحمراء القريبة، وانخفاض قيمه يدل على تدهور الغطاء النباتي نتيجة التلوث أو التوسع العمراني. أما مؤشر درجة حرارة سطح الأرض (LST) فقد استُخرج من الحزم الحرارية اعتمادًا على خوارزميات بلانك (Planck) ومعامل الانبعاثية، إذ تشير القيم المرتفعة له إلى ظاهرة الجزر الحرارية الناتجة عن الأنشطة الصناعية والحضرية (Anenberg, S. C., O. R. Cooper, and J.. 11, 2020, p. 128).

كما تم استخدام مؤشر الكثافة العمرانية (NDBI) المستند إلى الحزم (SWIR و NIR)لقياس التوسع العمراني المصاحب لزيادة مصادر التلوث، ومؤشر المياه المعياري (NDWI) المحسوب من الحزم الخضراء وتحت الحمراء القريبة لتقييم وفرة ونقاوة المياه السطحية، حيث تعكس القيم المنخفضة له شحة أو تلوث الموارد المائية. كذلك استُخدم مؤشر التربة الجرداء (BSI) المشتق من الحزم (SWIR, Red, NIR, Blue) للكشف عن الأراضي المتدهورة والجرداء التي تُعد أكثر عرضة للتلوث لرصد التلوث الهوائي بشكل مباشر، تم استخدام بيانات القمر الصناعي Sentinel-5P (TROPOMI)لاستخراج تراكيز الغازات الملوثة مثل SO_2و NO_2و CO عبر خوارزميات الاستشعار الطيفي (DOAS)، والتي تُعد من أدق المصادر في تتبع الملوثات الغازية وتوزيعها المكاني والزماني.

وقد أُدمجت نتائج هذه المؤشرات ضمن بيئة نظم المعلومات الجغرافية (GIS) لتكوين قاعدة بيانات مكانية متكاملة تُسهم في إنتاج خرائط دقيقة للتلوث البيئي، وتوضّح العلاقة بين التوسع العمراني والأنشطة البشرية والتغيرات البيئية في منطقة الدراسة.

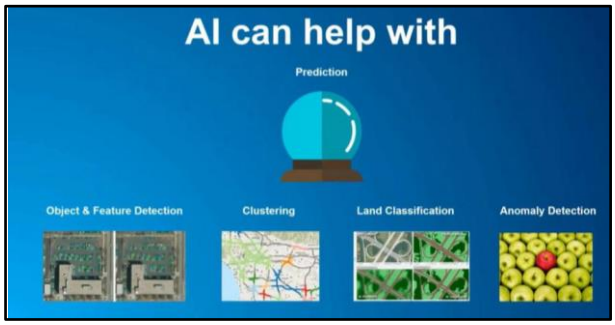
ثالثا: خطوات العمل في برنامج ArcGIS Pro

في البداية، يوضح الشكل (1) أدوات التعلم الآلي في برنامجArcGIS ، والتي تتضمن ثلاث وظائف أساسية هي التصنيف (Classification) لتحديد الأنماط والفئات في البيانات، والتجميع (Clustering) للكشف عن المجموعات المتشابهة، والتنبؤ (Prediction) الذي يهدف إلى استشراف الاتجاهات المستقبلية بالاعتماد على البيانات المكانية والزمنية. هذه الأدوات تمثل المدخل الأساسي لتطبيقات الذكاء الاصطناعي في نظم المعلومات الجغرافية.

الشكل (1) أدوات التعلم الآلي في برنامجArcGIS

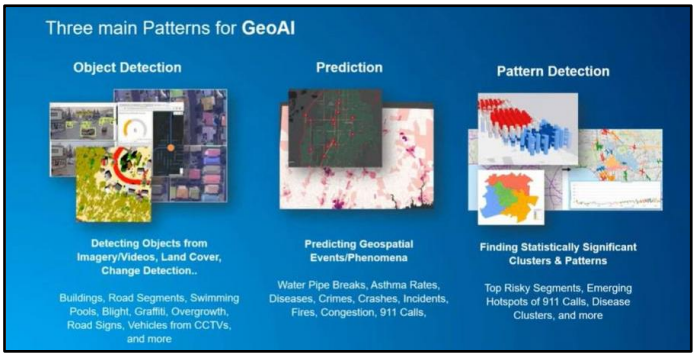
يمثل الشكل (2) المجالات التي يمكن أن يساعد فيها الذكاء الاصطناعي (AI) مثل التنبؤ، اكتشاف الأجسام والمعالم، التجميع، تصنيف الأراضي، واكتشاف الحالات الشاذة (Anomaly Detection).ويعكس ذلك اتساع تطبيقات الذكاء الاصطناعي في مجال تحليل البيئة والتلوث.

الشكل (2) المجالات التي يمكن أن يساعد فيها الذكاء الاصطناعي(AI)



أما الشكل (3) فيعرض الأنماط الرئيسة لتطبيقاتGeoAI ، والتي تنقسم إلى ثلاثة: الكشف عن الأجسام (Object Detection) من الصور الفضائية أو مقاطع الفيديو، التنبؤ بالأحداث أو الظواهر الجغرافية (Prediction) مثل الكوارث أو معدلات التلوث، وأخيرًا الكشف عن الأنماط (Pattern Detection) لإيجاد التكتلات أو العلاقات الإحصائية المهمة.

الشكل (3) الأنماط الرئيسة لتطبيقاتGeoAI

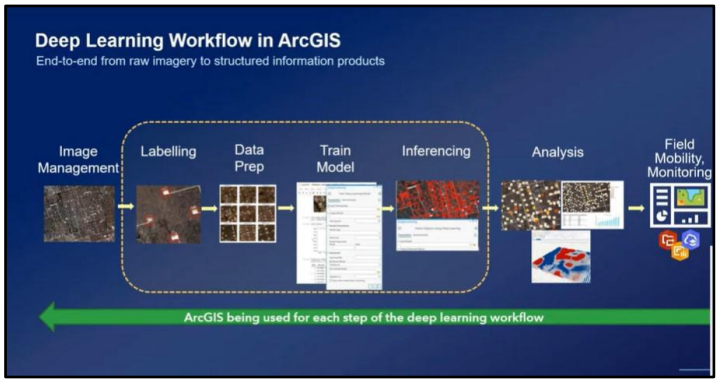


بعد توضيح التطبيقات النظرية، يبين الشكل (4) مراحل التعلم العميق في ArcGIS والتي تشمل: إعداد البيانات(Data Preparation) ، التدريب(Training) ، والاستدلال (Inferencing).هذا التقسيم يعطينا إطارًا عامًا لطبيعة العمل وكيفية تسلسل الخطوات.

الشكل (4) مراحل التعلم العميق فيArcGIS

ثم يوضح الشكل (5) مخطط سير العمل للتعلم العميق فيArcGIS ، والذي يبدأ بوسم العينات التدريبية(Label Training Samples) ، مرورًا بتحضير البيانات (Prepare Data for Training)، وتدريب النموذج(Train Deep Learning Model) ، وصولًا إلى الاستدلال (Inference)حيث يتم كشف وتصنيف الأجسام أو البكسلات. هذا المخطط يلخص التسلسل المنهجي للعملية.

الشكل (5) مخطط سير العمل للتعلم العميق فيArcGIS

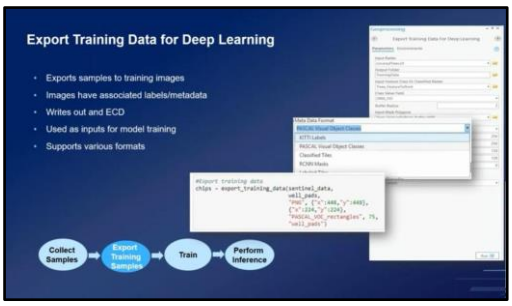


في الشكل (6) نلاحظ الخطوة الأولى العملية، وهي جمع العينات ووسمها (Collect Training Samples / Label Data)، حيث يتم تحديد العينات على الصور الفضائية أو الخرائط ومنحها فئات معينة تمثل المدخلات الرئيسة للتعلم العميق.

الشكل (6) جمع العينات ووسمها(Collect Training Samples / Label Data) ،

يتبع ذلك الشكل (7) الذي يعرض مرحلة تجهيز البيانات للتدريب (Export Training Data for Deep Learning)، إذ يتم تصدير العينات المجمعة إلى ملفات قابلة للاستخدام في النماذج العميقة، مع إرفاق البيانات الوصفية (Metadata) لتسهيل عملية التدريب.

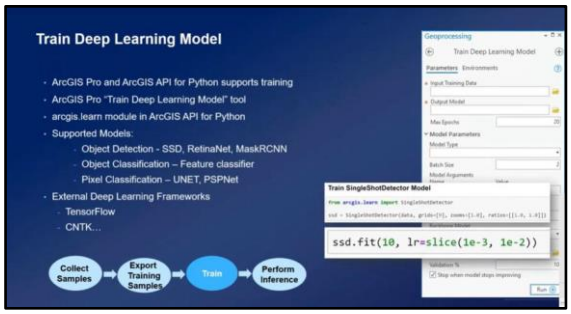
الشكل (7) مرحلة تجهيز البيانات للتدريب (Export Training Data for Deep Learning)،



أما الشكل (8) فيبين مرحلة تدريب النموذج(Train Deep Learning Model) ، والتي تشمل استخدام خوارزميات متعددة مثل SSD و RetinaNetو MaskRCNNللكشف عن

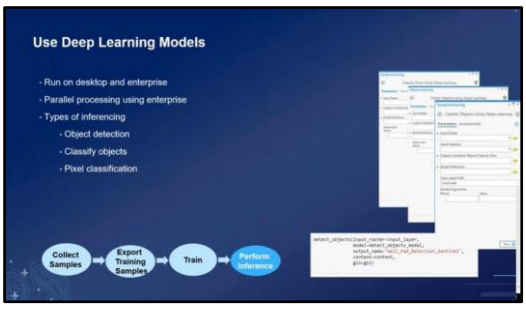
الأجسام، أو UNET و PSPNetلتصنيف البكسلات. وهنا يبدأ النموذج بالتعلم من البيانات المُجهزة.

الشكل (8) مرحلة تدريب النموذج(Train Deep Learning Model) ،



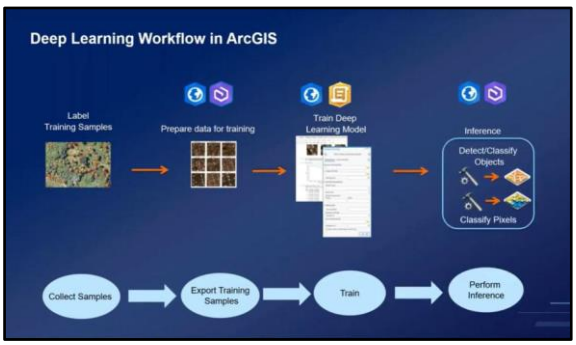
وفي الشكل (9) تظهر مرحلة الاستدلال (Use Deep Learning Models / Perform Inference)، والتي يتم فيها تطبيق النموذج المدرب على بيانات جديدة من أجل كشف وتصنيف الأجسام أو البكسلات، أي اختبار فعالية النموذج عمليًا.

الشكل (9) مرحلة الاستدلال



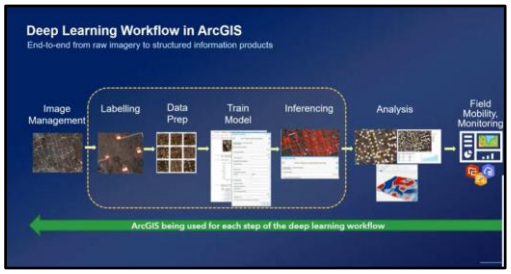
بعدها يوضح الشكل (10) حزمة التعلم العميق(Deep Learning Package – .dlpk) ، والتي تحتوي على ملفات النموذج والتعريفات الخاصة به ليتم حفظها ومشاركتها عبر المؤسسات البحثية أو بين أعضاء الفريق. هذه الخطوة مهمة في ضمان استدامة العمل وإعادة استخدام النماذج.

الشكل (10) حزمة التعلم العميق(Deep Learning Package – .dlpk) ،



وأخيرًا يوضح الشكل (11) المخطط الكامل لخطوات التعلم العميق فيArcGIS ، بدءًا من إدارة الصور (Image Management) ثم وسم البيانات (Labelling) وتحضيرها (Data Preparation)، مرورًا بتدريب النموذج (Train Model) والاستدلال(Inferencing) ، وصولًا إلى التحليل (Analysis) ثم المخرجات الميدانية .(Field Mobility, Monitoring) ويُعد هذا الشكل خريطة شاملة تلخص جميع الخطوات النظرية والتطبيقية للعملية.

الشكل (11) المخطط الكامل لخطوات التعلم العميق



1-خريطة الغطاء الأرضي:

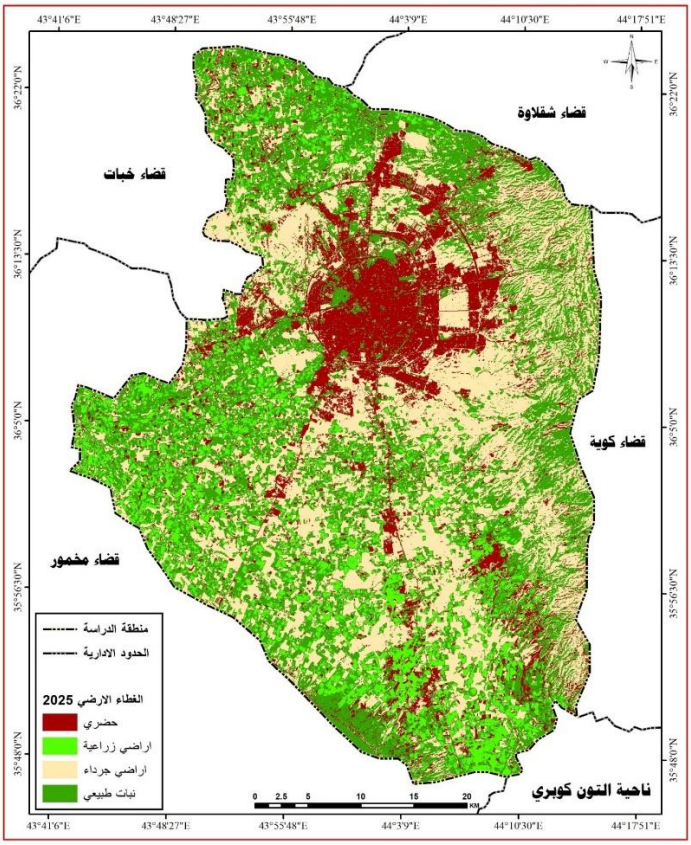
تُوضح الخريطة أن سهل أربيل يضم أربعة أنماط رئيسة من الغطاء الأرضي: المناطق الحضرية باللون الأحمر، والأراضي الزراعية بالأخضر الفاتح، والأراضي الجرداء بالبيج، والنبات الطبيعي بالأخضر الداكن. يتبين تركز عمراني كثيف في مركز المدينة يمتد على محاور الطرق الرئيسة، تحيط به أحزمة وبقع زراعية متقطعة، في حين تزداد الرقع الجرداء على الهضاب الشرقية والجنوبية الشرقية، مع وجود جيوب من النبات الطبيعي في السفوح والوديان.

تشير هذه الأنماط إلى ارتباط واضح بين التوسع الحضري والتلوث البيئي؛ إذ تُعد المناطق الحضرية ومحاور الطرق أكثر تعرضًا لانبعاثات الهواء الناتجة عن المرور والصناعات والمولدات، ما يؤدي إلى ارتفاع قيم LSTو NDBIوانخفاض NDVI، إضافة إلى احتمال زيادة تراكيز الغازات الملوثة(SO_2 ، NO_2) في المناطق الصناعية والعقد المرورية.

أما الرقع الزراعية والنبات الطبيعي فتسهم في خفض حرارة السطح وتحسين جودة الهواء، رغم إمكانية حدوث تلوث موضعي للتربة والمياه نتيجة الإفراط في استخدام الأسمدة أو حرق المخلفات. وتُعد الأراضي الجرداء مصدرًا للغبار وارتفاع حرارة السطح، مما يزيد هشاشة التعرية وانتقال الملوثات مع الجريان السطحي نحو المجاري المائية.

ونظرًا لأن الخريطة تمثل بيانات عام 2025، يُحتمل أن تكون ناتجة عن تصنيف تنبؤي لغطاء الأرض، مما يستدعي بيان دقة التصنيف ومساحات الفئات، وربطها بنتائج مؤشرات NDVIو LSTوخرائط الغازات والبؤر الساخنة للتحقق من التوافق المكاني، مع التأكيد على أهمية حماية الأحزمة الزراعية وتشجير الأراضي الجرداء وإقامة عوازل خضراء حول المناطق الصناعية

خريطة (2) الغطاء الأرضي في منطقة الدراسة



المصدر: اعتماد على المرئية الفضائية للقمر لاندسات 8 وبرنامج ArcPro

جدول(2) المساحة والنسبة المئوية لفئات الغطاء الأرضي وعلاقتها بالمؤشرات البيئية

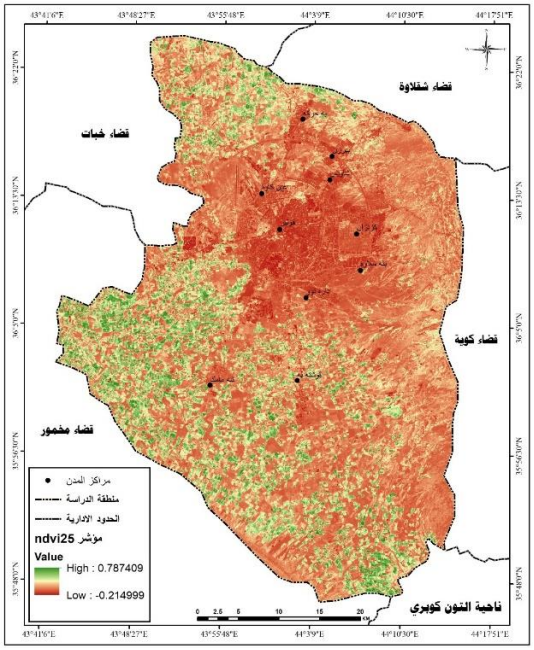
الفئة	الوصف	العلاقة بالتلوث	المساحة %	العلاقة مع المؤشرات الأخرى	التوصية
حضري	مركز العمران والتوسع الحضري	زيادة الانبعاثات والحرارة	30	NDBIمرتفع، LSTمرتفع، NDVIمنخفض	توسيع التشجير داخل المدينة
زراعي	الأراضي الزراعية المحيطة	امتصاص نسبي للتلوث مع احتمالية التلوث الزراعي	40	NDVIمرتفع، LSTمنخفض	الحفاظ على الأراضي الزراعية
جرداء	المناطق المكشوفة والهضاب	مصدر للغبار وارتفاع الحرارة	20	LSTمرتفع، NDVIمنخفض	تشجير المناطق الجرداء
نبات طبيعي	الأحزمة الخضراء والسفوح	تحسين جودة الهواء وتثبيت التربة	10	NDVIمرتفع، LSTمنخفض	حماية الغطاء الطبيعي

المصدر:الاعتماد على خريطة(2)

2-خريطة مؤشر الغطاء النباتي NDVI

تُظهر الخريطة تباين الغطاء النباتي في سهل أربيل، حيث تمثل القيم العالية باللون الأخضر مناطق الغطاء النباتي الكثيف والصحي، بينما تشير القيم المنخفضة بالبرتقالي والأحمر إلى أراضٍ جرداء أو متدهورة. يتضح انخفاض مؤشر NDVI في المركز الحضري نتيجة التوسع العمراني، وارتفاعه في الأطراف الزراعية والنباتية. تعكس هذه القيم علاقة عكسية بين النمو الحضري والتدهور البيئي، مما يؤكد أهمية التشجير والحفاظ على الرقعة الخضراء للحد من التلوث وتحسين الاستدامة البيئية

خريطة(3) مؤشر الغطاء النباتي المعياري(NDVI)



المصدر: اعتماد على المرئية الفضائية للقمر لاندسات 8 وبرنامج ArcPro

جدول(3) قيم NDVI وتوزيعها البيئي في منطقة الدراسة

القيمة	التوزيع	التفسير البيئي	المساحة %	العلاقة مع LST	التوصية
) 0.21-أدنى(	المناطق الحضرية والأراضي المكشوفة	تدهور نباتي وارتفاع احتمالية التلوث	35	موجب	زيادة التشجير
) 0.78أعلى(	المناطق الزراعية والنبات الطبيعي	غطاء نباتي صحي يقلل من التلوث	25	سالب	الحفاظ على الأراضي الخضراء

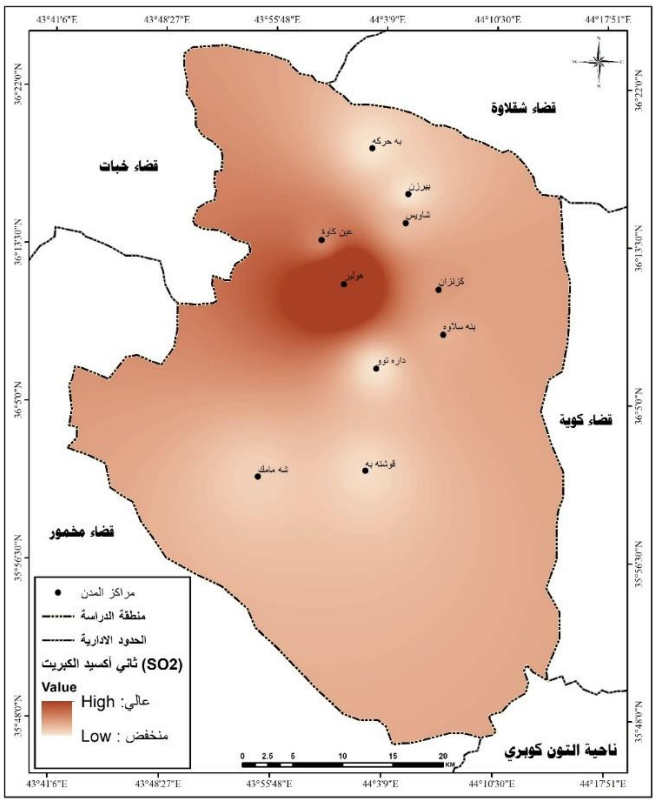
المصدر: الاعتماد على خريطة(3)

3- توزيع غاز **ثاني أوكسيد الكبريت(SO_2)**

الخريطة(4) تمثل توزيع غاز **ثاني أوكسيد الكبريت (SO_2)** في منطقة الدراسة، حيث تظهر القيم العالية باللون البني الداكن متمركزة بشكل أساسي في مركز مدينة أربيل. هذا التركز يرتبط بشكل مباشر بالنشاطات الحضرية المكثفة مثل حركة المرور الكثيفة، وخاصة من السيارات والشاحنات التي تستخدم وقوداً يحتوي على الكبريت، إضافة إلى الانبعاثات الناتجة عن بعض الأنشطة الصناعية ومحطات توليد الطاقة التي تعتمد على الوقود الأحفوري. في الأطراف والريف المحيط، يظهر اللون الفاتح الذي يعكس مستويات أقل من تركيز هذا الغاز، وذلك بسبب قلة الأنشطة الصناعية وقلة الكثافة السكانية هناك.

ثاني أوكسيد الكبريت يعد من الملوثات الخطيرة التي تؤثر بشكل مباشر على الصحة العامة، إذ يسبب التهابات في الجهاز التنفسي ويؤثر خصوصاً على الأطفال وكبار السن ومرضى الربو. كما يسهم هذا الغاز في تكوين الأمطار الحمضية التي تؤدي إلى تدهور التربة، تآكل المباني، وتدمير الغطاء النباتي، وهو ما ينعكس سلباً على النظام البيئي الزراعي في المناطق المحيطة. الخريطة تبرز أن الخطر البيئي أكثر ما يواجهه سكان مركز المدينة، ما يستدعي وضع استراتيجيات للحد من انبعاثات المركبات وتحسين نوعية الوقود المستخدم، إلى جانب التوسع في المساحات الخضراء التي يمكن أن تعمل كمرشحات طبيعية للملوثات.

خريطة(4) توزيع غاز ثاني أوكسيد الكبريت(SO_2 (SO_2 Concentration Map)



المصدر: اعتماد على المرئية الفضائية للقمر لاندسات 8 وبرنامج ArcPro

جدول(4) مستويات تركيز غاز ثاني أوكسيد الكبريت (SO_2) في منطقة الدراسة وعلاقتها بالمؤشرات البيئية"

المستوى	الموقع	التفسير البيئي	المساحة %	العلاقة مع المؤشرات الأخرى	التوصية
منخفض	الأطراف	بيئة أنظف نسبياً مع قلة الأنشطة	50	NDVIأعلى، LST منخفض	المحافظة على الأطراف وتقليل التلوث الزراعي
مرتفع	المركز الحضري	انبعاثات عالية من النقل والصناعة تؤثر على الصحة والبيئة	50	NDVIمنخفض، LST مرتفع، NDBIمرتفع	تحسين نوعية الوقود، مراقبة الصناعة

المصدر: الاعتماد على خريطة(4)

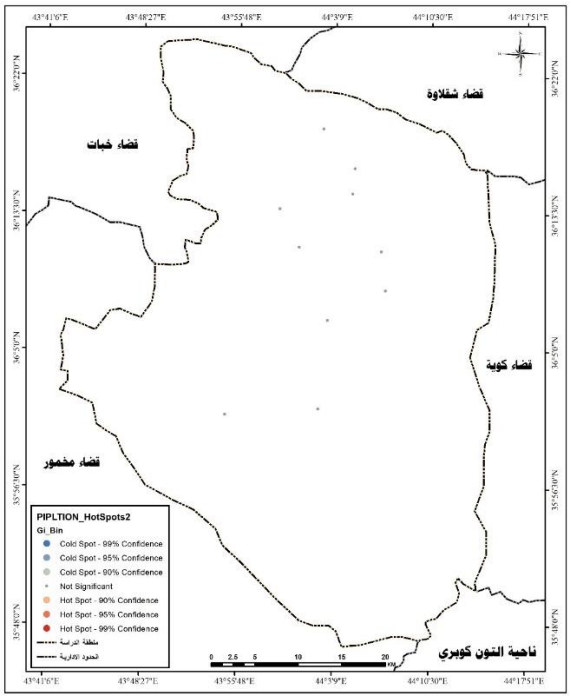
4- خريطة البؤر الساخنة(Hotspots Analysis)

الخريطة(4) تمثل نتائج **تحليل البؤر الساخنة (Hotspots Analysis)** باستخدام أسلوب*Gi ، إذ تهدف إلى الكشف عن مناطق التركّز المكاني للإيجابيات أو السلبيات المتعلقة بالتلوث أو أي متغير آخر قيد الدراسة. في هذه الخريطة لا تظهر بؤر ساخنة (Hot Spots) أو بؤر باردة (Cold Spots) ذات دلالة إحصائية عالية، بل أغلب النقاط موزعة ضمن فئة "Not

"Significant، أي أن التوزيع المكاني للملوثات في هذه المرحلة لا يبيّن تكتلات إحصائية واضحة بدرجة ثقة 90% أو أكثر.

هذا النمط يعني أن التلوث في المنطقة قد يكون موزعاً بشكل متباين لكنه لا يحقق التجمع المكاني الكافي ليظهر كبؤرة حرجة إحصائياً، أو أن العينة المكانية المحددة صغيرة نسبياً. مع ذلك، فإن غياب البؤر لا يعني غياب التلوث، بل يشير إلى أن الملوثات لا تتمركز في مناطق محددة بدرجة مؤثرة إحصائياً، وربما تتوزع بشكل متناثر أو متقطع. بيئياً، هذا يفرض تحدياً على إدارة التلوث إذ أن السياسات لا يمكن أن تركز على منطقة حرجة واحدة بل ينبغي أن تكون شاملة على نطاق واسع، مع مراعاة المناطق الحضرية ومصادر الانبعاثات المتفرقة.

خريطة(5) البؤر الساخنةHotspots Analysis Map



المصدر: اعتماد على المرئية الفضائية للقمر لاندسات 8 وبرنامج ArcPro

جدول(5) البؤر الساخنة/الباردة حسب تحليل Gi (Hotspots and Coldspots Analysis Results)

التحليل	الوصف	التفسير البيئي	المساحة %	العلاقة مع المؤشرات الأخرى	التوصية
Not Significant	غياب بؤر قوية ذات دلالة إحصائية	التلوث متوزع بشكل متقطع	70	توزيع متباين دون نمط واضح	توسيع الرصد الميداني
Hot Spot	منطقة ذات تركّز ملوثات عالي	احتمالية تركز انبعاثات في مناطق محددة	20	يتطابق مع مراكز حضرية وصناعية	تركيز الجهود في مراكز التلوث

Cold Spot	منطقة أقل تلوثاً إحصائياً	بيئة أقل تلوثاً نسبياً	10	يتطابق مع مناطق زراعية أو طبيعية	الحفاظ على الوضع البيئي الحالي

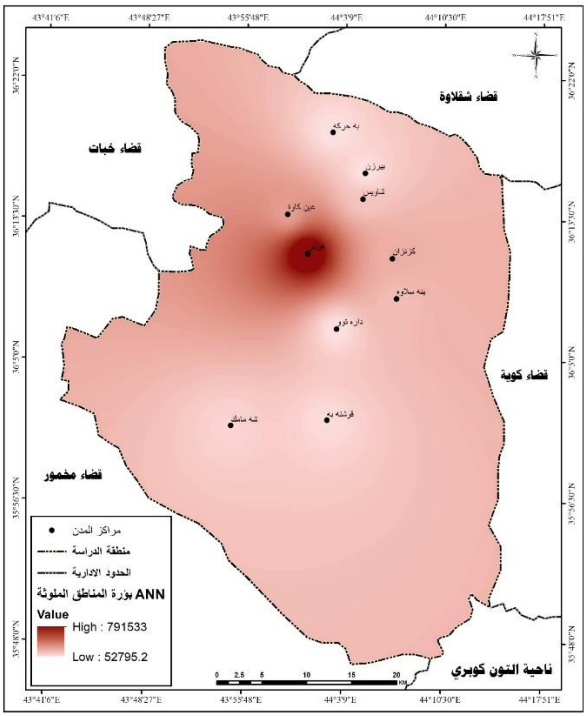
المصدر: الاعتماد على خريطة(5)

5-خريطة مؤشر أقرب جار(ANN)

توضح الخريطة نتائج تحليل مؤشر أقرب جار (ANN) لتوزيع التلوث في سهل أربيل، حيث تُظهر القيم العالية باللون الغامق تمركز الملوثات في مركز المدينة نتيجة الكثافة السكانية والنشاطات الحضرية والصناعية، بينما تنخفض القيم تدريجيًا باتجاه الأطراف ذات النشاط المحدود.

يشير هذا التركز إلى تأثير مباشر للتلوث الهوائي على الصحة العامة وارتفاع درجات الحرارة المحلية (ظاهرة الجزيرة الحرارية)، مما يؤكد ضرورة تبنّي إجراءات بيئية مثل زيادة المساحات الخضراء وتحسين وسائل النقل العام لتقليل الانبعاثات في المناطق الحضرية

خريطة(6) التنبؤ باستخدام(ANN (Artificial Neural Network Prediction Map



المصدر: اعتماد على المرئية الفضائية للقمر لاندسات 8 وبرنامج ArcPro

جدول(6) نتائج الانحدار الخطي للتنبؤ بالملوثات (Regression Results for Pollution Prediction)

القيمة	الموقع	التفسير البيئي	المساحة %	العلاقة مع المؤشرات الأخرى	التوصية
52795 (أدنى)	الأطراف الريفية	انخفاض التركز المكاني للتلوث	40	NDVIأعلى، LSTأدنى	الحفاظ على المناطق الريفية كنقاط عازلة
791533 (أعلى)	مركز مدينة أربيل	بؤرة تلوث حضري وصناعي كثيف	60	NDVIمنخفض، LSTمرتفع، SO2مرتفع	توسيع التشجير وتقليل الانبعاثات الصناعية

المصدر:الاعتماد على خريطة(6)

الاستنتاجات

1. التوسع الحضري على حساب الأراضي الزراعية هو العامل الرئيس في ارتفاع مستويات التلوث بمنطقة الدراسة.
2. انخفاض قيم NDVIفي المناطق الحضرية يعكس تدهور الغطاء النباتي وزيادة الانبعاثات.
3. مدينة أربيل تمثل مركز التركز الأعلى للتلوث، خصوصاً فيما يتعلق بانبعاثات SO_2 الناتجة عن الأنشطة الصناعية والنقل.

التوصيات

1. إنشاء وزيادة المساحات الخضراء داخل المدن للتخفيف من آثار التلوث.
2. تعزيز النقل العام والاعتماد على الطاقة المتجددة للحد من الانبعاثات.
3. متابعة ورصد نوعية الهواء بشكل دوري باستخدام تقنيات GIS والاستشعار عن بعد لدعم اتخاذ القرار.

شكر وتقدير

أتقدم بجزيل الشكر إلى جامعة تكريت / كلية الآداب / قسم الجغرافية ونظم المعلومات الجغرافية على دعمها العلمي والإداري الذي أسهم في إنجاز هذا البحث، متمنيةً دوام التوفيق والتقدم للمسيرة العلمية في جامعتنا العزيزة.

References

1. Al-Shammari, A. S. M., & Al-Subaihi, A. M. S. (2022). The impact of human activities on air pollution in Salah Al-Din Governorate. *Journal of Al-Farahidi Arts*, 14(51, Part 3), 220–240.
2. Al-Azzawi, S. A. A. (2018). Air pollution and its impact on the urban environment of Kirkuk City. *Journal of Al-Farahidi Arts*, (34), 215–232.
3. Adduri, S. D., & Ali, T. A. (2025). A GeoAI-powered air quality monitoring and forecasting system. *Journal of Environmental Modelling and GeoAI Studies*, 8(1), 48.
4. Alvarez, C. I., Rowley, A., & Ortega, F. (2024). Assessing air quality dynamics during short-period social upheaval events in Quito, Ecuador. *Atmospheric Research Letters*, 19(4), 315.
5. Anenberg, S. C., Cooper, O. R., & West, J. J. (2020). Using satellites to track indicators of global air pollution. *Environmental Research Letters*, 15(11), 128.
6. Rouse et al. (1974); Zha et al. (2003); McFeeters (1996); Weng et al. (2004);Rikimaru et al. (2002); Veefkind et al. (2012).