ISSN: 2706-6495

جودة الهواء في محافظة العلا (دراسة في جغرافية البيئة)

Air quality in Al-Ula Governorate (A study in environmental geography)

إعداد:

الباحث/ زياد بن شامي جابر الغبيشي

معلم بتعليم منطقة المدينة المنورة، باحث دكتوراه الفلسفة في الجغرافيا الطبيعية، جامعة القصيم، المملكة العربية السعودية

Email: t9790396@mb.moe.gov.sa

الأستاذ الدكتور/ حسين أحمد عذاب المحمد

أستاذ الجغرافية المُناخية، قسم الجغرافيا، كلية اللغات والعلوم الإنسانية، جامعة القصيم، المملكة العربية السعودية

الملخص:

تُعد جودة الهواء من أهم التحديات البيئية التي تواجه العالم المعاصر، حيث تؤثر مباشرة على الصحة العامة والتنمية المستدامة والأنظمة الإيكولوجية. ووفقاً لمنظمة الصحة العالمية، يتعرض أكثر من 90% من سكان العالم لمستويات تلوث هواء تتجاوز المعايير الصحية الموصى بها، مما يؤدي إلى حوالي 7 ملايين حالة وفاة مبكرة سنوياً.

وتهدف هذه الدراسة إلى تحقيق تحليل التباين المكاني لجودة الهواء بمحافظة العلا باستخدام نظم المعلومات الجغرافية ومسبباتها. وتتجسد الأهمية بدراسة التباين المكاني لجودة الهواء لمنطقة الدراسة والبيانات لعام 2020م / 2023م، ولأنه لم يتم تناولها على مستوى الدراسات والابحاث الخاصة بجودة الهواء، ايضاً المحافظة على البيئة المستدامة لها وحسب رؤية المملكة 2030م.

وتتناول هذه الدراسة توضيح مفاهيم جودة الهواء، ومصادر التلوث الجوية، والعناصر المناخية، كذلك دراسة التباين المكاني لجودة الهواء بالمحافظة، وتراكيز الملوثات الجوية، والتغير الزمني لاتجاهات السلاسل الزمنية اليومية للملوثات الجوية، والتحليل الاحصائي للتوزيع الطبيعي لتركيز الملوثات، والتغير الزمني لمؤشر جودة الهواء في محافظة العلا.

وتستند هذه الدراسة إلى تحليل الخرائط المكانية المشتقة من بيانات القمر الصناعي Sentinel-5P للفترة 2020م–2023م، حيث تُظهر كل خريطة التوزيع المكاني لمتوسط تركيز ملوّث محدد عبر محافظة العُلا وكذلك تحديد النطاقات الكمية والأنماط المكانية بالخرائط، والتكوين الشامل لجودة الهواء وتوزيع مصادر التلوث بالمحافظة.

الكلمات المفتاحية: جودة الهواء، التوزيع المكاني، التغير الزمني، التحليل الاحصائي، مؤشر جودة الهواء، محافظة العلا.

ISSN: 2706-6495

Air quality in Al-Ula Governorate (A study in environmental geography)

Ziyad bin Shami Jaber Al-Ghabayshi

Teacher in the Madinah region, PhD candidate in Physical Geography, Qassim University, Saudi Arabia

Dr. Hussein Ahmed Athab Al-Mohammed

Professor of Climatology, Department of Geography, College of Languages and Humanities, Qassim University, Saudi Arabia

Abstract :

Air quality is considered one of the most important environmental challenges facing the contemporary world, as it directly affects public health, sustainable development, and ecosystems. According to the World Health Organization, more than 90% of the world's population is exposed to air pollution levels exceeding recommended health standards, leading to approximately 7 million premature deaths annually.

This study aims to achieve a spatial variance analysis of air quality in Al-Ula Governorate using Geographic Information Systems and its causes. The importance of this lies in studying the spatial variation of air quality in the study area and the data for the years 2020 / 2023, especially since it has not been addressed in previous studies and research on air quality. It also relates to maintaining a sustainable environment in line with the Kingdom of Saudi Arabia's Vision 2030.

This study addresses clarifying the concepts of air quality, sources of air pollution, and climatic elements. It also examines the spatial variation of air quality in the governorate, the concentrations of air pollutants, the temporal change of daily time series trends of air pollutants, the statistical analysis of the normal distribution of pollutant concentrations, and the temporal change of the air qualit index in Al-Ula Governorate.

This study is based on the analysis of spatial maps derived from Sentinel-5P satellite data for the period 2020–2023. Each map shows the spatial distribution of the average concentration of a specific pollutant across Al-Ula Governorate, as well as identifying the quantitative ranges and spatial patterns on the maps, the overall composition of air quality, and the distribution of pollution sources in the governorate.

Keywords: Air quality, spatial distribution, temporal variation, statistical analysis, air quality index, Al-Ula Governorate.

ISSN: 2706-6495

1. المقدمة:

تعتبر البيئة إحدى أهم عوامل الطبيعة الهامة، وهي من ركائز التنمية المستدامة، وتعد الأبحاث والدراسات السابقة عن جودة الهواء من أهم الطرق والأساليب لمعرفة مدى انتشار وتوسع هذا الضرر في البيئة وفي كمية تلوث الهواء، وزاد الاهتمام بجودة الهواء والملوثات الهوائية بسبب الدور الكبير لظاهرة الاحتباس الحراري وتغير المناخ في الآونة الأخيرة منذ أكثر من عقدين من الزمن. وتعد الأبحاث والدراسات السابقة عن جودة الهواء من أهم الطرق والأساليب لمعرفة مدى انتشار وتوسع هذا الضرر في البيئة وفي كمية تلوث الهواء، وزاد الاهتمام بجودة الهواء والملوثات الهوائية بسبب الدور الكبير لظاهرة الاحتباس الحراري وتغير المناخ في الآونة الأخيرة منذ أكثر من عقدين من الزمن.

وتقدر تكلفة عبء تلوث الهواء بنحو 5 % من الناتج المحلى الإجمالي وفقاً الصادر عن البنك الدولي عام 2020، وتتوقف نوعية الهواء على مقدار ونوعية التلوث الموجود به، سواء كان ذلك شوائب غازية أو صلبة أو سائلة تؤثر في نوعية الهواء أو تركيبه، وأكدت معظم الدراسات المهتمة بتلوث الهواء وآثاره أن التعرض للجسيمات العالقة (TSP)، والعوائق الدقيقة والأتربة التي يبلغ قطرها أو يقل عن 10 ميكرون، والعوالق الدقيقة جداً التي يقل قطرها عن 2.5 ميكرون يزيد من معدل الوفيات لأمراض القلب والجهاز التنفسي، لصغر حجمها وقدرتها على اختراق الجهاز التنفسي (منظمة الصحة العالمية https://www.who.int/ar).

وفي عام 2016، تسبب تلوث الهواء المحيط وحده في حدوث 4.2 مليون حالة وفاة، بينما تسبب استهلاك الملوثات والتلوث في وفاة ما يقدر بـ 3.8 مليون حالة في نفس الفترة. (موقع الأمم المتحدة https://www.un.org/ar).

وفي هذه الدراسة سوف نقوم بالتعرف على عناصر جودة الهواء النقي في محافظة العلا بحيث نبرز أهم العناصر لهذه الملوثات وهي (AAI) و أول أكسيد الكربون (CO) وثاني أكسيد النيتروجين (NO2) وثاني أكسيد الكبريت (SO2) والأوزون (O3) والجسيمات الخشنة (PM10).

1.1. مشكلة الدراسة:

تشهد محافظة العلا في الآونة الأخيرة حركة سياحية كبيرة وتطوراً سريعاً في كافة المجالات، وأصبحت في مقدمة المدن السياحية في المملكة، ومن أسئلة الدراسة بيان مواقع تركز ملوثات الهواء وأهمها بمحافظة العلا، وعلاقة عناصر المناخ وتلوث الهواء في منطقة الدراسة. وشهدت محافظة العلا تغيرات خلال العقود القليلة الماضية بالأخص منذ العام 2018 وبعده من تطور حركة السياحة الكبيرة وافتتاح المشاريع التنموية المستدامة ونحوها، وبحسب هيئة الإحصاء العامة لعام 2022م فقد تضاعف عدد السكان بالمحافظة إلى (60.103) نسمه، وذلك بسبب ما تشهده المحافظة من تطور سريع في مجال السياحة والآثار، بالإضافة إلى إنشاء الهيئة الملكية لمحافظة العلا التي تهتم بجميع النواحي البيئية والسياحية والحياة الفطرية وغيرها.

2.1. أهداف الدراسة:

1- تحليل التباين المكاني لجودة الهواء بمحافظة العلا باستخدام نظم المعلومات الجغرافية ومسبباتها.

2- تحليل وإبراز العلاقة بين عناصر المناخ وتلوث الهواء في منطقة الدراسة.

3.1. أهمية الدراسة:

تتجسد الأهمية في عدم وجود دراسات وأبحاث علمية عن جودة الهواء بمحافظة العلا، وتكمن أهمية الدراسة أيضا في التعرف

ISSN: 2706-6495

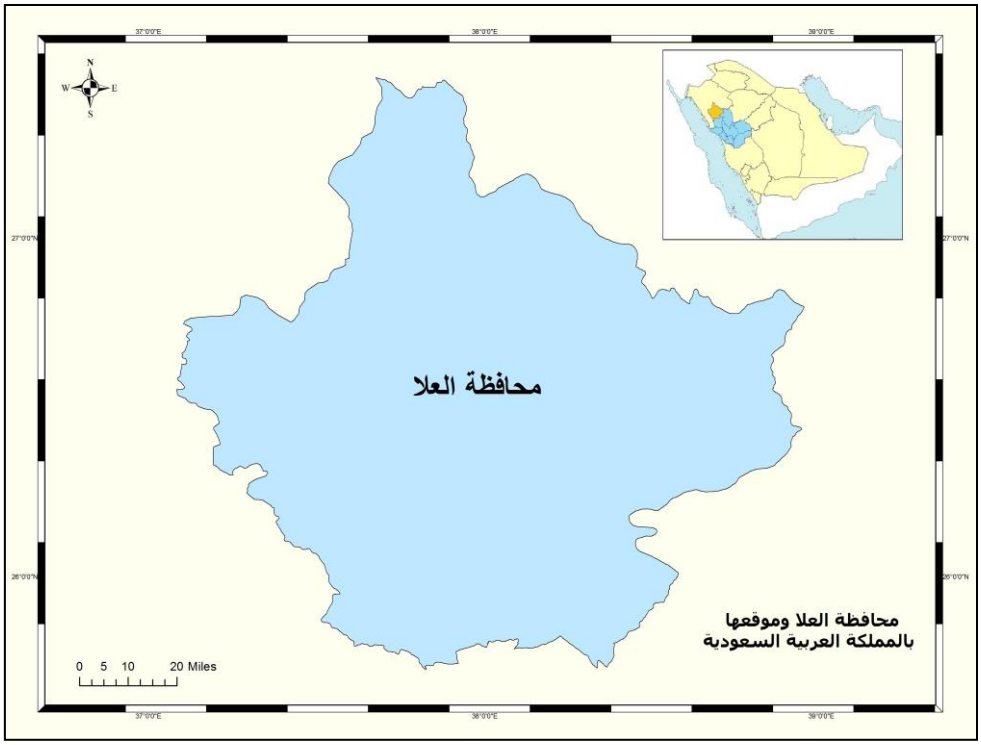
على ملوثات الهواء بالإضافة إلى دراسة مصادره ونحوها مثل الكثافة السياحية من حركة المرور والأنشطة المرتبطة بها، وكل ذلك بما يخدم المحافظة من السكان وايضاً من النواحي الزراعية والخدمية والسياحية، حيث تشهد العلا حركة سياحية كبيرة في أخر خمس سنين.

وتعتبر الإضافة العلمية لهذه الدراسة أنها هي الأساس لمعرفة جودة الهواء في محافظة العلا، حيث تسعى هذه الدراسة على قياس جودة الهواء وعناصره بالمحافظة والعمل على تقديم ما يخدمها ويخدم مشروع تطوير العلا حسب رؤية المملكة العربية السعودية 2030م.

4.1. منطقة الدراسة:

تقع محافظة العلا في الجزء الشمالي الغربي من منطقة المدينة المنورة بالمملكة العربية السعودية، بين خطي طول (37°) و (39°) ودائرتي عرض (25º) و (27º) شمال خط الاستواء. وتتبع المحافظة من الناحية الإدارية منطقة المدينة المنورة، وبها تسع مراكز إدارية تتبع المحافظة الشكل (1-2)، وتبلغ مساحة محافظة العلا (22.561 كم^2). وقد أسهم موقعها الجغرافي على الطريق البري التجاري، والمعروف بطريق البخور في أن تكون على مدى العصور التاريخية موطنا للحضارات. الشكل (1-1) (الفقير، 2009م، ص1).

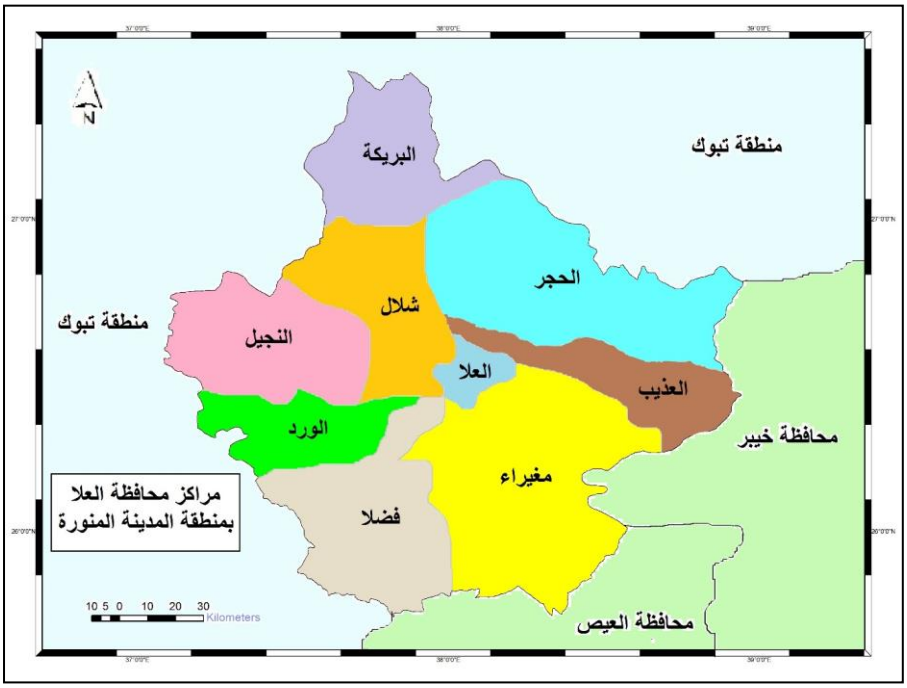
شكل (1-1) موقع محافظة العلا من المملكة العربية السعودية ومنطقة المدينة المنورة.



المصدر: من إعداد الباحثان بالاعتماد على بيانات الهيئة الملكية بمحافظة العلا(2024م) Arc Map 10.8

ISSN: 2706-6495

شكل (1-2) موقع محافظة العلا ومراكزها الإدارية.



المصدر: من إعداد الباحثان بالاعتماد على بيانات الهيئة الملكية بمحافظة العلا(2024م) Arc Map 10.8

ومن السمات الرئيسية لمناخ العلا درجة الحرارة حيث تكون مرتفعة جداً خلال فصل الصيف، حيث يمكن أن تصل درجات الحرارة إلى أكثر من 40 درجة مئوية. وتكون الرطوبة منخفضة، مما يجعل الجو جافًا وحارًا. بينما خلال فصل الشتاء درجة الحرارة تكون معتدلة خلال النهار وباردة نسبيًا خلال الليل قد تنخفض درجات الحرارة إلى أقل من 10 درجات مئوية ليلاً. ويبلغ معدل الأمطار السنوي 254 ملم، ويبلغ ارتفاع العلا عن سطح البحر ما بين 765 إلى 825 متراً (العنزي، زبن معزي صالح، 1416ه، ص 241). ويبين الجدول (1) العناصر المناخية بمحافظة العلا كما يلي:

جدول (1) العناصر المناخية بمحافظة العلا بمنطقة المدينة المنورة عام 2023م

الشهر	متوسط سرعة الرياح	متوسط الضغط الجوي (محطة)	متوسط درجة الحرارة	متوسط الرطوبة	إجمالي الأمطار
يناير	6.2	906	11.6	73.4	52.2
فبراير	6.1	904.2	13.9	42.5	0.2
مارس	6.6	901.3	18.8	43.3	40.3
أبريل	6.7	901.1	21	44.3	56.9
مايو	6.4	899.2	28.3	24.3	30.3
يونيو	7.2	897.6	32.7	22.3	7.6
يوليو	6.4	896	35.5	14.4	0
أغسطس	6.7	897.1	35.4	16.5	0

ISSN: 2706-6495

سبتمبر	6.1	898.6	33.9	16.1	0
أكتوبر	6.2	904	27.5	36.5	10.3
نوفمبر	6.1	904.7	19.6	59.9	19.8
ديسمبر	5.9	906.2	15	58.3	5.4

المصدر: من إعداد الباحثان بالاعتماد على بيانات المركز الوطني للأرصاد بمحافظة العلا(2023م)

2. الدراسات السابقة:

هناك العديد من الدراسات التي تناولت تلوث الهواء على مستوى المملكة العربية السعودية والوطن العربي والعالم من جوانب مختلفة، وقد تنوعت هذه الدراسات بين العربية والأجنبية:

فتطرقت دراسة **السلطان (2008) لتلوث الهواء في مدينة الجبيل في المنطقة الشرقية في المملكة العربية السعودية في الفترة 1998-2006م**، حيث تناولت الدراسة مدة وجود بعض العناصر الملوثة للغلاف الجوي وتركيزها غير المناسب والضار في سبع محطات رصد منتشرة في أرجاء مدينة الجبيل في المنطقة الشرقية من المملكة العربية السعودية خلال الفترة بين عام 1998-2006م، وهي: أول أكسيد الكربون (CO) وثاني أكسيد النيتروجين (NO2) وثاني أكسيد الكبريت (SO2) والأوزون (O3) والجسيمات الخشنة (PM10). والناعمة (Pm2.5). وقد استخدمت المعايير العالمية المقترحة من قبل وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة الأمريكية (EPA)، والمعايير المستخدمة في المملكة العربية السعودية في تصنيف قيم تركيزها. وأجريت مقارنات بين قياساتها في كل سنة من سنوات الدراسة في كل محطة على حدة، ومقارنات بين القياسات في المحطات جميعها باستخدام أسلوب تحليل التباين (ANOVA) واختبار (T) للفرق بين المتوسطات، وهذه الدراسة عملت في منطقة صناعية بينما دراستنا عن محافظة العلا وهي محافظة زراعية وسياحية وبيئتها الطبيعية، حيث تقوم دراستنا بالعمل على محطة أرضية واحدة متواجدة بالمحافظة عكس الجبيل التي تتوفر بها سبع محطات تابعة للهيئة الملكية.

وتطرق **القحطاني (2009) في دراسته لتلوث الهواء في مدينة أبها الحضرية وأجريت هذه الدراسة في منطقة عسير**، والتي تعاني من مشكلة تنامي مصادر التلوث وعشوائية التوزيع. ولوحظ أن هناك عدم وجود أي ثقافة بيئية بين أفراد المجتمع، وترى الدراسة ضرورة تبني خطة عمل لتثقيف أفراد المجتمع. ومن نتائج الدراسة أن ملوثات الهواء في منطقة الدراسة ستزداد ما لم يتم تقليص مصادره وإزالة أسبابها. كما تبين نتائج الدراسة أن درجة تركيز بعض ملوثات الهواء في أبها قد تجاوزت المقاييس المستخدمة (مقاييس دول مجلس التعاون لدول الخليج) ويجب الحد من مصادر تلك الملوثات. كذلك تشير الدراسة إلى ارتفاع في معدل الإصابة ببعض الأمراض في منطقة أبها مثل أمراض الجهاز التنفسي والحساسية والربو خاصة تلك الأمراض التي تأتي من الملوثات الجوية.

وبينت **العباد (2012) بعنوان أثر العواصف في جودة الهواء ومدلولاتها على صحة الأنسان في المنطقة الشرقية بالمملكة العربية السعودية**. سردت التحليل المكاني لانتشار وتركز الغبار بفعل العواصف الرملية التي شهدتها المنطقة الشرقية، وآثره في جودة هواء، ومدلولاته على صحة سكان المنطقة الشرقية. واعتمدت الدراسة على الاستشعار عن بعد والقمر الصناعي Merra-2، وتوصلت نتائج البحث إلى أن هناك تجاوز لمستويات الغبار للمعايير البيئية في جميع العواصف الرملية التي تعرض لها المنطقة.

وأهتم **حبيب وآخرون، (2013) بدراسة تأثير الطقس على جودة الهواء للمدن الحضرية في المملكة المتحدة**، حيث تناولت هذه الدراسة علاقة الطقس مع جودة الهواء بالمدن البريطانية، وتم اختيار ثلاث مدن نورج وسوانزي ودوفر وذلك لمعرفة الطبوغرافية التي تربطها في بعض والتأثير على الموقع العام. حيث كل مدينة لها نوع معين من تأثير الملوثات من ثاني أكسيد النتروجين والتربة في مدينة نورج، والتقلبات الجوية في مدينة سوانزي، وثاني أكسيد الكبريت الذي ينبعث من المركبات في مدينة دوفر.

وهدفت **دراسة الظفيري (2015) التقييم البيئي المتكامل لجودة الهواء لمحافظة الأحمدي في دولة الكويت إلى إجراء تقييم متكامل لجودة الهواء في محافظة الأحمدي**، وتم استخدام وجمع بيانات الملوثات الأربعة وهي (SO2، H2S، O3 ، NO2) وتم معالجة ومقارنة البيانات مع معايير دولة الكويت القياسية لجودة الهواء في المناطق السكانية والصناعية. كذلك أوصت الدراسة بإلزام القطاع الصناعي استخدام التكنولوجيا الخضراء، والإنتاج النظيف، وتبني مقاييس الجودة العالية ومن التوسع العمراني نحو المناطق الصناعية.

و**دراسة العلياني (2016) تقييم جودة الهواء في مدينة الجبيل الصناعية** تهدف إلى دراسة تقييم جودة الهواء في المدينة وقياس عناصر سبع ملوثات هوائية وهي (PM2.5، PM10، CO، SO2، H2S، O3، NO2) والتي تقاس من سبع محطات رصد ثابتة موزعة في أنحاء مدينة الجبيل لمدة ثمانية سنوات للفترة 2006-2013م، حيث تم مقارنتها بمعايير جودة الهواء ومعايير الهيئة العامة للأرصاد وحماية البيئة. أوصت الدراسة بتحديث معايير جودة الهواء في السعودية والمقارنة مع دول الخليج العربي ووضع أجهزة تحسس للأدخنة الصادرة من المصانع ونحوها.

و**دراسة الغامدي وآخرون (2016) للرياح وجودة الهواء في مدينة مكة المكرمة والمشاعر المقدسة**، حيث تناولت الدراسة استخدام تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية لرصد وتحليل خصائص الرياح وجودة الهواء في مكة المكرمة والمشاعر المقدسة، وتحديد تكراريه هبوب الرياح الاتجاهات السائدة، اضافة الى دراسة نسب الملوثات الجوية وأنواعها في هواء المدينة والمشاعر المقدسة، ومدى تأثيرها بحركة الرياح وتغيراتها اليومية والفصلية وذلك لتحديد جودة الهواء ومقارنتها ومن نتائجها أن المركبات هي مصدر الملوثات الجوية، ولم يظهر هناك علاقة واضحه بين سرعة الرياح والاتربة المستنشقة ونحوها، وتفرق عن دراستي لجودة الهواء بمحافظة العلا أنها تدرس علاقة سرعة الرياح بالملوثات الجوية بينما دراستي عن جودة الهواء وما يصاحبه من تلوث ونحوه.

و**تطرقت محمد (2018) التباين المكاني لتلوث الهواء بمدينة مكة المكرمة**، حيث تهدف إلى معرفة أسباب التباين المكاني لتلوث الهواء في مكة المكرمة، واعتمدت الدراسة على استخدام خمس محطات أرضية موزعة على مدينة مكة المكرمة، كذلك ساهم الازدحام المروري خاصة في موسم الحج والعمرة وشهر رمضان في انتشار الغازات الملوثة للهواء، بجانب انبعاث الغازات من المركبات، والأنشطة المثارة بفعل حركة الحشود، مع تحديد مصادر تلوث الهواء بمكة، كذلك عمليات الهدم والبناء والأحياء العشوائية الضيقة، ويعتبر غاز الأوزون والجسيمات العالقة بأكاسيد النيتروجين هي الأكثر تركيزاً في هواء مكة.

و**دراسة Btesam، Seham (2020) عن تقدير جودة الهواء باستخدام تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية المكانية على طول مسار قطار الشمال مدينة القريات في المملكة العربية السعودية**، وتناولت تلوث الهواء ودراسة العلاقة مع الأرصاد الجوية وعرصت درجة الحرارة وسرعة الرياح، واستخدمت صور الأقمار الصناعية، والدراسة الزيارات الميدانية المختلفة لتوزيع استبيانات على المقيمين للحصول على معلومات حول صحتهم والحصول على آرائهم حول جودة الهواء.

ودراسة **الغبيشي (2021) تلوث الهواء بمدينة ينبع الصناعية دراسة في جغرافية البيئة** حيث تهدف هذه الدراسة إلى الكشف عن مصادر التلوث بالهواء في مدينة ينبع الصناعية، ايضاً الجهود الكبيرة التي تقوم بها الهيئة الملكية في التخفيف من آثار هذا التلوث وطرق حماية السكان بالمدينة بشكل يلبي حاجتهم وسلامتهم. واعتمدت الدراسة على محطة واحدة من أصل خمس محطات لمراقبة جودة الهواء في المنطقة الصناعية، ومحطة واحدة في المنطقة السكنية لعام 2019، وايضاً العلاقة بين عناصر المناخ وعناصر تلوث الهواء بمنطقة الدراسة، وخلصت الدراسة إلى توافق نسب الغازات مع معايير جودة الهواء لدول الخليج العربية، والمركز الوطني للرقابة على الالتزام البيئي.

وبينت دراسة عبد القادر (2022) رصد ومراقبة تلوث الهواء في محافظة صلاح الدين باستخدام القمر الصناعي sentinel-5 وتناولت الدراسة مراقبة تراكيز الغازات الملوثات للهواء في محافظة صلاح الدين خلال فترة جائحة كرورنا، وإجراء قياسات الغلاف الجوي بدقة مكانية وزمانية عالية لمعرفة جودة الهواء ومراقبة المناخ والتنبؤ به، كما تعرضت الدراسة إلى العوامل البشرية المؤثرة في تلوث الهواء، واعتمدت الدراسة على استخدام صور القمر الصناعي sentinel-5 واشارت نتائج الدراسة إلى أن تأثير النشاط الصناعي في المحافظة وأثره على التلوث الهوائي في المحافظة عن طريق الغازات الثقيلة التي تطلقها مصانع الاسمنت والطابوق، وأوصت الدراسة تجهيز الصناعات الملوثة للبيئة بعيداً عن أماكن تمركز البشر.

3. الخطوات المنهجية للدراسة:

اعتمدت الدراسة على بعض من المناهج الجغرافية تبعاً لأهداف الدراسة وطبيعة البيانات المستخدمة محل المشكلة والمنهج التطبيقي هو المنهج الذي يعتمد على السبب والنتيجة كوسيلة لتحديد هدف ما وتم استخدامه لمعالجة المشكلة محل الدراسة وذلك في تحديد أسباب تلوث الهواء وعلاقته بالخصائص البشرية. والمنهج الوصفي التحليلي: تم الاعتماد على هذا المنهج في تفسير وتحليل البيانات الزمانية والمكانية لجودة الهواء، ودراسة العوامل الجغرافية المؤثرة بالظاهرة والعلاقات المتبادلة فيما بينهم للوصول لأفضل النتائج. أما بالنسبة لأساليب المعالجة فهي متعددة ومن أهمها ما يلي:

أ- **الأسلوب الكمي**: تتمثل أهم المقاييس الإحصائية في المتوسط والوسيط والمنوال، وحساب المتوسط الحسابي (Mean) والمدى (Range) والانحراف المعياري (Standard Deviation) لقيم الملوثات الساعية والشهرية والسنوية لملوثات الهواء المختارة ومقارنتها بمعايير جودة الهواء المستخرجة من بيانات القمر الصناعي Sentinel-5P للفترة 2020م–2023م.

ب- **الأسلوب الكارتوجرافي:** حيث يتم من خلاله رسم الأشكال البيانية لجودة الهواء، فضلاً عن الخرائط التوضيحية لمناطق تركز تلوث الهواء وإظهار التباين المكاني على مستوى محافظة العلا.

ه- **نظم المعلومات الجغرافية (GIS):** لما لها من فائدة كبيرة ومتعاظمة فيما يتعلق بطرق وأساليب جمع وتخزين البيانات واسترجاع للبيانات، وقابليتها للإضافة والحذف والتعديل، وسهولة عرض المعلومات المكانية للتفسير والتحليل بشكل دقيق. والاستعانة بأسلوب التحليل المكاني المتوفرة في بيئة نظم المعلومات الجغرافية (ArcGIS Pro) وإجراء منهجية التحليل (Spatial Analyst) لتقييم واقع تلوث الهواء.

- **دليل جودة الهواء لمنطقة الدراسة** جدول (2) حيث أنها طريقة مبسطة للتعريف بحالة جودة الهواء، ويستند على البيانات الواردة من محطات رصد ومراقبة جودة الهواء، حيث يتم تحويل تراكيز الملوثات إلى أرقام بسيطة يمكن أن يفهمها عموم الناس وإظهارها على شكل ألوان محددة.

ISSN: 2706-6495

ويعبر دليل جودة الهواء عن ملوثات الهواء الرئيسية الخمس وهي: أول أكسيد الكربون (CO) وثاني أكسيد النيتروجين (NO2) وثاني أكسيد الكبريت (SO2) والأوزون (O3) والجسيمات الخشنة (PM10).

جدول (2) وصف دليل جودة الهواء

اللون	القيمة	وصف دليل جودة الهواء
أخضر-صحي	50-0	تعتبر الحالة جيدة جداً، وتراكيز جميع ملوثات الهواء أدنى من المعايير المسموح بها.
أصفر-معتدل	100-51	تعتبر الحالة مقبولة، وتراكيز جميع ملوثات الهواء ضمن الحدود المسموح بها
برتقالي-غير صحي للمجموعات الحساسة	150-101	تعتبر الحالة متوسطة بتسجيل تجاوز بسيط عن الحدود المسموح بها، وقد يعاني بعض الأفراد ذوي الحساسية من تأثيرات صحية، ولكن على الاغلب لا يتأثر عموم الناس بذلك.
أحمر-غير صحي	200-151	تعتبر الحالة غير صحية بتسجيل تجاوز هام عن الحدود المسموح بها، وقد يعاني الأفراد من مصابي أمراض الحساسية المزيد من الأعراض الصحية.
بنفسجي-ضار	300-201	تعتبر الحالة غير صحية بتاتاً بتسجيل تجاوز عالي جداً عن الحدود المسموح بها، وفي هذه الحالة من الضروري إطلاق تحذيرات صحية بوجود حالة طارئة، ومن المحتمل أن يتأثر عموم الناس بذلك.
بني-خطر	500-301	تعتبر الحالة قد وصلت إلى مستويات خطرة على صحة الأنسان.

المصدر: (المركز الوطني للرقابة على الالتزام البيئي-مؤشر جودة الهواء)

4. ملوثات الهواء ومصادرها:

تنقسم مصادر التلوث الهوائي الى مصدرين رئيسين هي ملوثات ذات منشأ طبيعي من مواد معدنية وكائنات دقيقة وغيرها والتربة (عمليات الجرف وغيرها). أما الملوثات الغير طبيعية فهي ملوثات ناتجة عن احتراق الوقود اللازم للصناعة وسائل النقل والتدفئة: مركبات الكربون Co،Co_2 ومركبات الكبريت So_2 الذي يتحول الى So_3 ومع الرطوبة ويتحول الى H_2So_4 وهو حمض الكبريت. أكاسيد النيتروجين N0،No_2 . وعنصر الرصاص وخاصة في مادة البنزين (من السيارات).

1.4. التوزيع المكاني لتركيزات الملوثات الجوية فوق محافظة العلا للفترة (2020م-2023م):

سبق وأن ذكرنا سابقاً أن هذه الدراسة تستند إلى تحليل الخرائط المكانية المشتقة من بيانات القمر الصناعي Sentinel-5P للفترة 2020م–2023م، حيث تُظهر كل خريطة التوزيع المكاني لمتوسط تركيز ملوّث محدد عبر محافظة العُلا كما في الشكل (2). يتيح التدرج اللوني المعتمد في كل خريطة تحديد النطاقات الكمية والأنماط المكانية، مما يوفر فهماً شاملاً لجودة الهواء الإقليمية وتوزيع مصادر التلوث.

تُظهر خريطة AAI أعلى تباين مكاني بين جميع الملوثات المدروسة، حيث يتراوح النطاق من القيم القريبة من الصفر إلى حوالي 2.0 وحدة. يتمركز أعلى تركيز للهباء الممتص في الأجزاء الشمالية والشمالية الشرقية من المحافظة، حيث تظهر القيم باللون البني الداكن. هذا التوزيع يشير إلى تراكم الجسيمات الماصة للإشعاع مثل الغبار المعدني والسخام في هذه المناطق.

ISSN: 2706-6495

ينخفض التركيز تدريجياً نحو الجنوب والجنوب الغربي، مما يشكل تدرجاً واضحاً عبر المحافظة. هذا النمط المكاني يرجح تأثير عوامل طبوغرافية ومناخية في توجيه مسارات الرياح المحملة بالغبار وتحديد مناطق الترسيب المفضل (Hoffmann et al., 2008).

تعرض خريطة CO نطاقاً كمياً يتراوح بين 0.023 و0.037 mol/m²، مما يعكس مستويات متوسطة من هذا الغاز المؤشر على عمليات الاحتراق غير الكامل. يُلاحظ تدرج مكاني واضح من الشرق نحو الغرب، حيث تسجل المناطق الشرقية والجنوبية الشرقية أعلى التراكيز (باللون الأحمر الداكن)، بينما تنخفض القيم تدريجياً نحو الشمال الغربي (باللون الأزرق). هذا التوزيع يشير إلى تأثير النقل الجوي الإقليمي أكثر من المصادر المحلية المركزة، حيث تحمل الكتل الهوائية القادمة من الشرق تراكيز أعلى من CO (Chin et al., 2007).

تُظهر خريطة NO_2 أدنى التراكيز العامة بين جميع الملوثات، بنطاق يتراوح من 7×10^{-7} إلى 3×10^{-6} mol/m². رغم انخفاض المستويات العامة، تظهر بقع مرتفعة محدودة باللون الأرجواني الداكن تتركز في شريط وسطي يمتد عبر المحافظة. هذه الرقع المرتفعة قد تشير إلى مناطق نشاط بشري محدود مثل الطرق الرئيسية أو المراكز العمرانية الصغيرة. انخفاض التراكيز في الأطراف يعكس الطبيعة الصحراوية للمنطقة وقلة مصادر الاحتراق المروري والصناعي (Madany& Danish, 1993).

تعرض خريطة الأوزون نطاقاً ضيقاً نسبياً يتراوح بين 0.122 و0.125 mol/m²، مما يشير إلى تجانس نسبي في التوزيع المكاني. تظهر ارتفاعات طفيفة في المناطق الشمالية الوسطى باللون الأزرق الفاتح، بينما تنخفض القيم نسبياً في الأجزاء الشرقية. هذا التوزيع المتجانس يعكس طبيعة الأوزون كملوث ثانوي يتشكل من التفاعلات الفوتوكيميائية بين أكاسيد النيتروجين والمركبات العضوية المتطايرة تحت تأثير الإشعاع الشمسي (Jenkin & Clemitshaw, 2000) . غياب التباينات الحادة يشير إلى سيطرة الخلفية الإقليمية والنقل الجوي على التوزيع المحلي، مع تأثير محدود للمصادر النفضية (Lu et al., 2019).

تُظهر خريطة $PM_{2.5}$ تبايناً مكانياً كبيراً بنطاق يتراوح من حوالي 5 إلى 15 ميكروغرام/م³. تتركز أعلى التراكيز في الأجزاء الجنوبية والجنوبية الشرقية من المحافظة (باللون الأحمر)، بينما تنخفض تدريجياً نحو الشمال الغربي (باللون الأزرق). هذا النمط يشير إلى تأثير أحداث النقل الغباري القادمة من الجنوب والشرق، والتي تحمل جسيمات دقيقة من المناطق الصحراوية المجاورة (Yarmohamadi et al., 2023). الانخفاض التدريجي شمالاً قد يعكس تأثير العوامل الطبوغرافية والمناخية التي تساعد على تشتت الجسيمات وتحسين التهوية في هذه المناطق (Wang et al., 2024) .

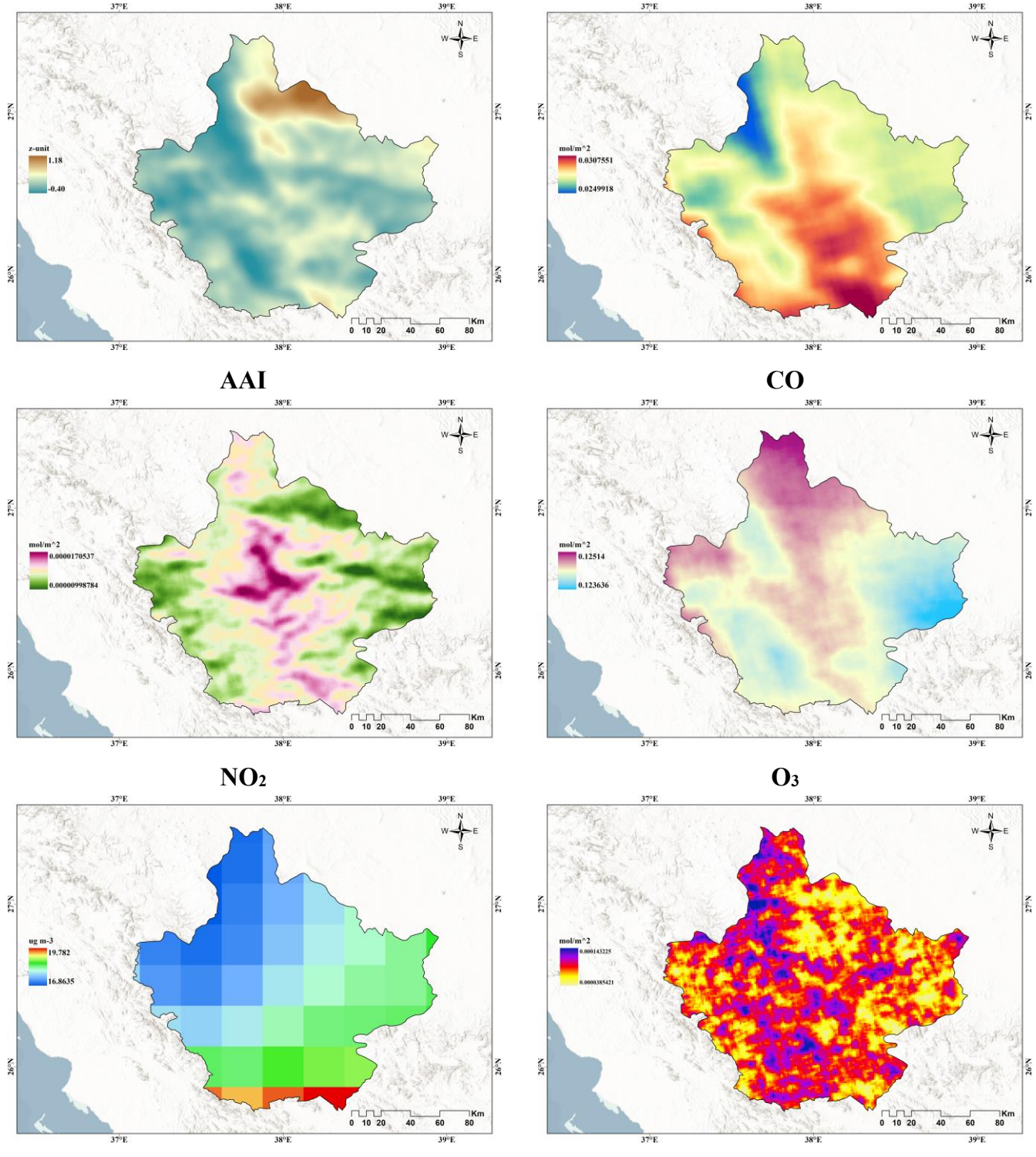
تعرض خريطة SO_2 أدنى التراكيز المطلقة بنطاق يتراوح من 8×10^{-5} إلى 2×10^{-4} mol/m²، مع توزيع متناثر للقيم المرتفعة عبر كامل المحافظة. تظهر الخريطة خلفية منخفضة عامة باللون الأزرق الداكن، مع بقع صغيرة متفرقة باللون الأحمر والأصفر موزعة بشكل عشوائي. هذا النمط يشير إلى غياب مصادر صناعية كبيرة ثابتة لانبعاثات SO_2 داخل المحافظة (السهلي والجاسر، 2025). أيضا لارتفاعات الموضعية الصغيرة قد تكون مرتبطة بأنشطة احتراق محدودة أو عمليات نقل جوي عابرة من مستويات علوية في الغلاف الجوي.

يكشف التحليل المقارن للخرائط الست عن ثلاثة أنماط مكانية متميزة: أولاً، الملوثات الجسيمية (AAI و$PM_{2.5}$) تُظهر أعلى تباين مكاني وأوضح الاتجاهات الجغرافية، مما يؤكد هيمنة العبء الغباري على جودة الهواء في العُلا.

ISSN: 2706-6495

ثانياً، الغازات ذات النقل الإقليمي (CO وO_3) تعرض تدرجات واسعة النطاق وأكثر تجانساً، مما يعكس تأثير الخلفية الإقليمية والظروف المناخية. ثالثاً، غازات المصادر المحلية (NO_2 وSO_2) تبقى منخفضة التركيز مع توزيع موضعي محدود، مما يتسق مع الطبيعة الصحراوية للمنطقة وقلة الأنشطة الصناعية والمرورية الكثيفة.

شكل (2) التوزيع المكاني لتركيزات الملوثات الجوية فوق محافظة العلا للفترة (2020م-2023م)



المصدر: من إعداد الباحثان بالاعتماد على بيانات القمر الصناعي (Sentinel-5P)- (2020م-2023م)

2.4. التغير الزمني لاتجاهات السلاسل الزمنية اليومية للملوثات الجوية فوق محافظة العلا للفترة (2020م-2023م):

يعرض الشكل (3) ست سلاسل زمنية يومية للملوّثات الجوية الرئيسة فوق محافظة العُلا شملت مؤشر امتصاص الهباء الجوي AAI، وأول أكسيد الكربون CO، وثاني أكسيد النيتروجين NO_2، والأوزون O_3، والجسيمات الدقيقة PM2.5، وثاني أكسيد الكبريت SO_2. تم تقدير خط اتجاه خطي لكل سلسلة مع الإبلاغ عن قيمة الميل ومعامل التحديد R^2 ودلالة الميل، ما يتيح تقييم التغيرات طويلة المدى مقابل التقلبات القصيرة والموسمية وذلك كما يوضحه جدول (3).

يبيّن AAI اتجاهاً صاعداً واضحاً ذا دلالة إحصائية عالية ($P < 0.001$) بميل يقارب 1.095×10^{-3} وحدة/يوم أو 0.400 وحدة/سنة، ومعامل تفسير مرتفع نسبياً $R^2=0.37$، ما يدل على زيادة منهجية في الحمل الجسيمي الممتص عبر السنوات. هذه النتيجة تتسق مع بيئة صحراوية تتكرر فيها العواصف الترابية وتزداد فيها شدة أو تكرار النقل الغباري، إذ إن AAI حساس للجسيمات الماصّة مثل الغبار المعدني والسخام (Knippertz et al., 2017). في المقابل يُظهر CO اتجاهاً هابطاً صغيراً ذا دلالة إحصائية عالية ($P < 0.001$) بميل -1.95×10^{-6} وحدة/يوم أو -7.12×10^{-4} وحدة/سنة، مع $R^2=0.12$، أي أن جزءاً محدوداً من التباين يفسّره الاتجاه بينما تبقى الإشارة موسمية الطابع بقمم وقيعان سنوية. هذا الانخفاض الطفيف يمكن تفسيره بتحسن تدريجي في الخلفية الإقليمية أو بتغير أنماط التهوية والنقل الجوي أكثر من كونه تحولاً حاداً في الانبعاثات المحلية (Amann et al., 2013).

أما NO_2 وSO_2 فلا يبدوان على أي اتجاه ذي دلالة إحصائية ($P > 0.05$)، إذ تقترب ميولهما من الصفر (4.38×10^{-10} و-1.14×10^{-8} وحدة/يوم على التوالي) مع قيم R^2 متدنية جداً (0.01 لكليهما)، ما يشير إلى ثبات بنيوي في المصادر النفضية والاحتراقية الثقيلة، وانحصار التغير في نطاق تذبذبات يومية وموسمية حول مستويات منخفضة (Mallik & Lal, 2014). يتّسم O_3 بديناميكية موسمية واضحة (قمم صيفية مرتبطة بالإشعاع والحرارة) من دون اتجاه طويل المدى ذي دلالة إحصائية ($P > 0.05$) بميل -5.19×10^{-7} وحدة/يوم أو -1.89×10^{-4} وحدة/سنة، وهو ما يعكس استقرار مزيج السلائف (NOx/VOC) والبنية الفوتوكيميائية المحلية (Kwok et al., 2015). بالنسبة لـ PM2.5، فالميل سلبي صغير - 2.80×10^{-3} وحدة/يوم أو -1.02 وحدة/سنة لكنه دال إحصائياً بقوة ($P < 0.001$) بينما R^2 ضعيف (0.02)، وتتحكم الذُرى الحادة القصيرة المرتبطة غالباً بأحداث الغبار في معظم التباين، ما يستدعي الحذر في تفسير الاتجاه الخطي بوصفه تحسناً مؤكداً (Alsubhi & Alsubhi, 2025).

تؤكد الأنماط الموسمية المشتركة بين CO وO_3 وNO_2 تأثير العوامل الأرصادية في العلا، مثل عمق طبقة الخلط وتبدل نظم الرياح الموسمية، إضافةً إلى النقل الإقليمي للملوّثات. في الوقت ذاته، تكشف الذُرى الحادة في AAI وPM2.5 عن بصمة أحداث ترابية متقطّعة تفوق في تأثيرها الاتجاهات البطيئة، وهو ما يبرر الحاجة إلى منظومات إنذار مبكر للإبلاغ عن العواصف الرملية وإجراءات حماية قصيرة الأمد للسكان والزوار (Modaihsh et al., 2015) .

تتحدد قوة الاستنتاجات بقيم R^2 والدلالة الإحصائية: فبينما يدعم R^2 المرتفع نسبياً في AAI (0.37) مع الدلالة الإحصائية العالية وجود تغير بنيوي تصاعدي، فإن انخفاض R^2 في CO وPM2.5 (0.12 و0.02) رغم دلالتهما الإحصائية العالية يعني أن العوامل غير الخطية والموسمية والطقسية تفسّر غالبية التباين، بينما عدم الدلالة الإحصائية لـ NO_2 وO_3 وSO_2 يجعل أي تغيرات ظاهرية غير موثوقة علمياً. وعليه، يُوصى مستقبلاً بفصل أفضل للمكوّن الموسمي عن الاتجاه باستخدام نماذج مضافة أو تحليل STL، وربط الذُرى ببيانات الرياح والعواصف الترابية، مع تعزيز القياسات السطحية المرجعية للتحقق من صحة المنتجات الفضائية وتقدير التعرض عند مستوى التنفس. إجمالاً، تُظهر محافظة العلا ثلاث ملوثات ذات اتجاهات دالة إحصائياً:

ISSN: 2706-6495

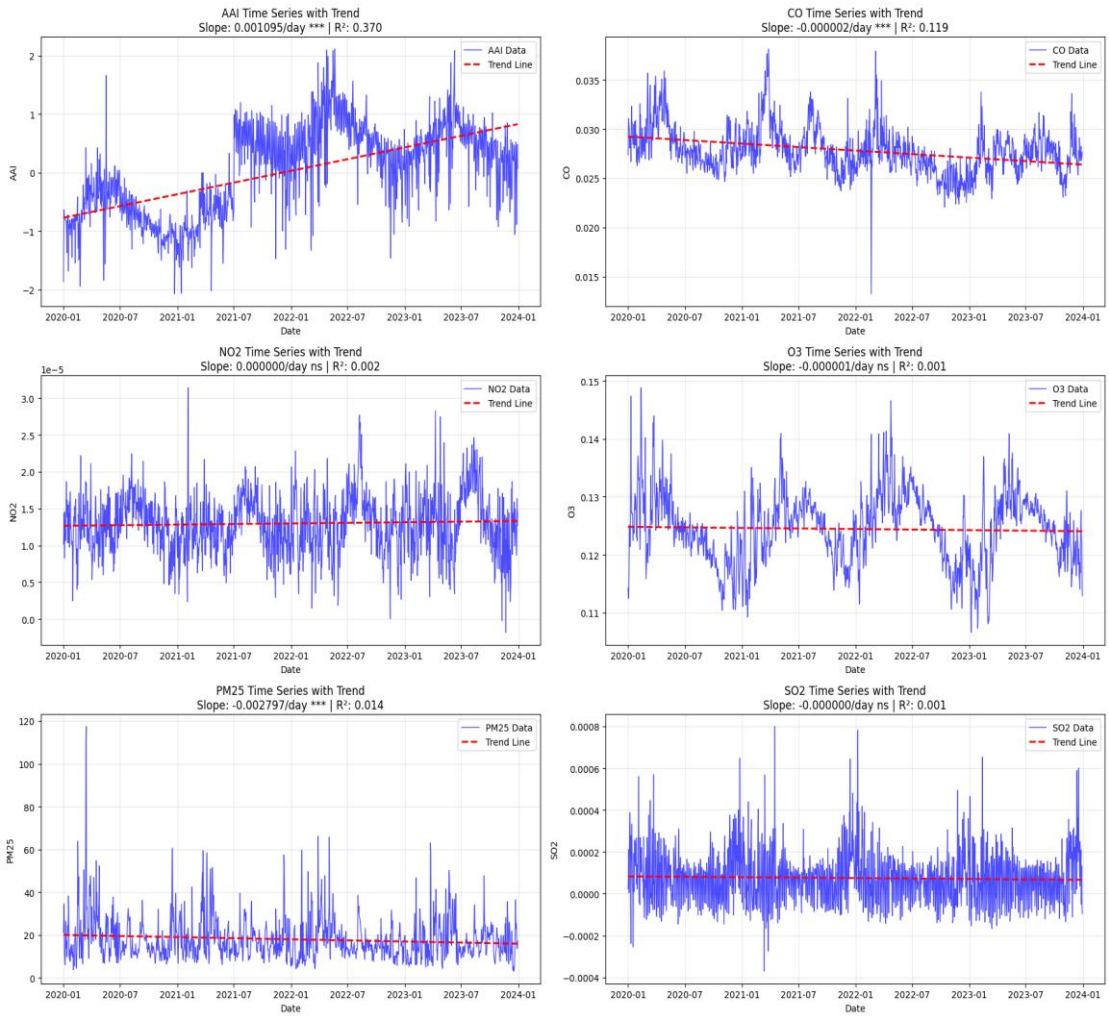
AAI مع زيادة ملحوظة، وCO وPM2.5 مع انخفاضات طفيفة، بينما تبقى الغازات الأخرى مستقرة بدون دلالة إحصائية، ما يجعل إدارة مخاطر الغبار أولوية للصحة العامة وجودة هواء المنطقة.

جدول (3) الاتجاهات الزمنية للملوثات الجوية في محافظة العُلا (2020م-2023م)

الملوثات	الميل اليومي	الميل السنوي	معامل التحديد (R^2)	P_VALUE
AAI	1.095×10^{-3}	0.400	0.37	دال إحصائياً بقوة ($P < 0.001$)
CO	-1.95×10^{-6}	-7.12×10^{-4}	0.12	دال إحصائياً بقوة ($P < 0.001$)
NO_2	4.38×10^{-10}	1.60×10^{-7}	0.01	غير دال إحصائياً ($P > 0.05$)
O_3	-5.19×10^{-7}	-1.89×10^{-4}	0.01	غير دال إحصائياً ($P > 0.05$)
$PM_{2.5}$	-2.80×10^{-3}	-1.02	0.02	دال إحصائياً بقوة ($P < 0.001$)
SO_2	-1.14×10^{-8}	-4.15×10^{-6}	0.01	غير دال إحصائياً ($P > 0.05$)

المصدر: من إعداد الباحثان بالاعتماد على بيانات القمر الصناعي (Sentinel-5P)- (2020م-2023م)

شكل (3) تركيزات ملوّثات الهواء فوق محافظة العُلا (2020م–2023م): الاتجاهات الزمنية لـAAI، CO، NO_2، O_3، PM2.5، SO_2.



المصدر: من إعداد الباحثان بالاعتماد على بيانات القمر الصناعي (Sentinel-5P)- (2020م-2023م)

ISSN: 2706-6495

3.4. التحليل الإحصائي للتوزيع الطبيعي لتراكيز الملوثات الجوية في محافظة العُلا (2020-2023):

يعرض الشكل (4) التوزيعات التكرارية (Histograms) للملوثات الجوية الستة المدروسة، مع منحنيات التوزيع الطبيعي المُدرجة لتقييم مدى اقتراب البيانات من التوزيع الطبيعي. يوفر هذا التحليل نظرة شاملة على الخصائص الإحصائية لكل ملوث ويساعد في فهم طبيعة التقلبات والقيم الشاذة في البيانات المرصودة.

أ- التوزيعات ذات النمط الطبيعي المتماثل:

يُظهر مؤشر امتصاص الهباء الجوي (AAI) توزيعاً ثنائي الذروة (Bimodal) واضحاً، حيث تظهر ذروتان متميزتان عند القيم السالبة (حوالي -0.5) والموجبة (حوالي 0.8). هذا النمط يشير إلى وجود حالتين مناخيتين متميزتين في المنطقة: فترات الهدوء النسبي مع قيم AAI منخفضة أو سالبة، وفترات النشاط الغباري مع قيم مرتفعة موجبة. التوزيع الثنائي يعكس الطبيعة الموسمية للعواصف الترابية والتباين الكبير في شدة الأحداث الجسيمية عبر السنة (المطيري، وعيد، 2023). بالمقارنة، يُظهر أول أكسيد الكربون (CO) توزيعاً شبه طبيعي أحادي الذروة يتراوح بين 0.015 و0.035 وحدة، مع تركز أعلى التكرارات حول 0.026-0.028 وحدة. التماثل النسبي للتوزيع يشير إلى هيمنة العمليات العشوائية والخلفية الإقليمية على تقلبات CO، مع غياب الأحداث الشاذة المتكررة.

ب- التوزيعات ذات الانحراف الموجب:

تُظهر الجسيمات الدقيقة ($PM_{2.5}$) توزيعاً شديد الانحراف نحو اليمين (Right-skewed)، حيث تتركز غالبية القيم في النطاق المنخفض (0-20 ميكروغرام/م^3) مع ذيل طويل يمتد إلى قيم عالية تتجاوز 100 ميكروغرام/م^3. هذا النمط يعكس هيمنة الظروف العادية ذات التراكيز المنخفضة مع أحداث استثنائية متقطعة (عواصف ترابية شديدة) تُسجل قيماً عالية جداً. الذيل الطويل يؤكد على الطبيعة الحدثية للتلوث الجسيمي في المنطقة الصحراوية. بشكل مماثل، يُظهر ثاني أكسيد النيتروجين (NO_2) توزيعاً منحرفاً نحو اليمين مع تركز معظم القيم في النطاق المنخفض ($0.5-2.0\times10^{-5}$) وذيل يمتد إلى قيم أعلى. هذا يشير إلى خلفية منخفضة مستمرة مع ارتفاعات موضعية متقطعة مرتبطة بأنشطة احتراق محلية محدودة.

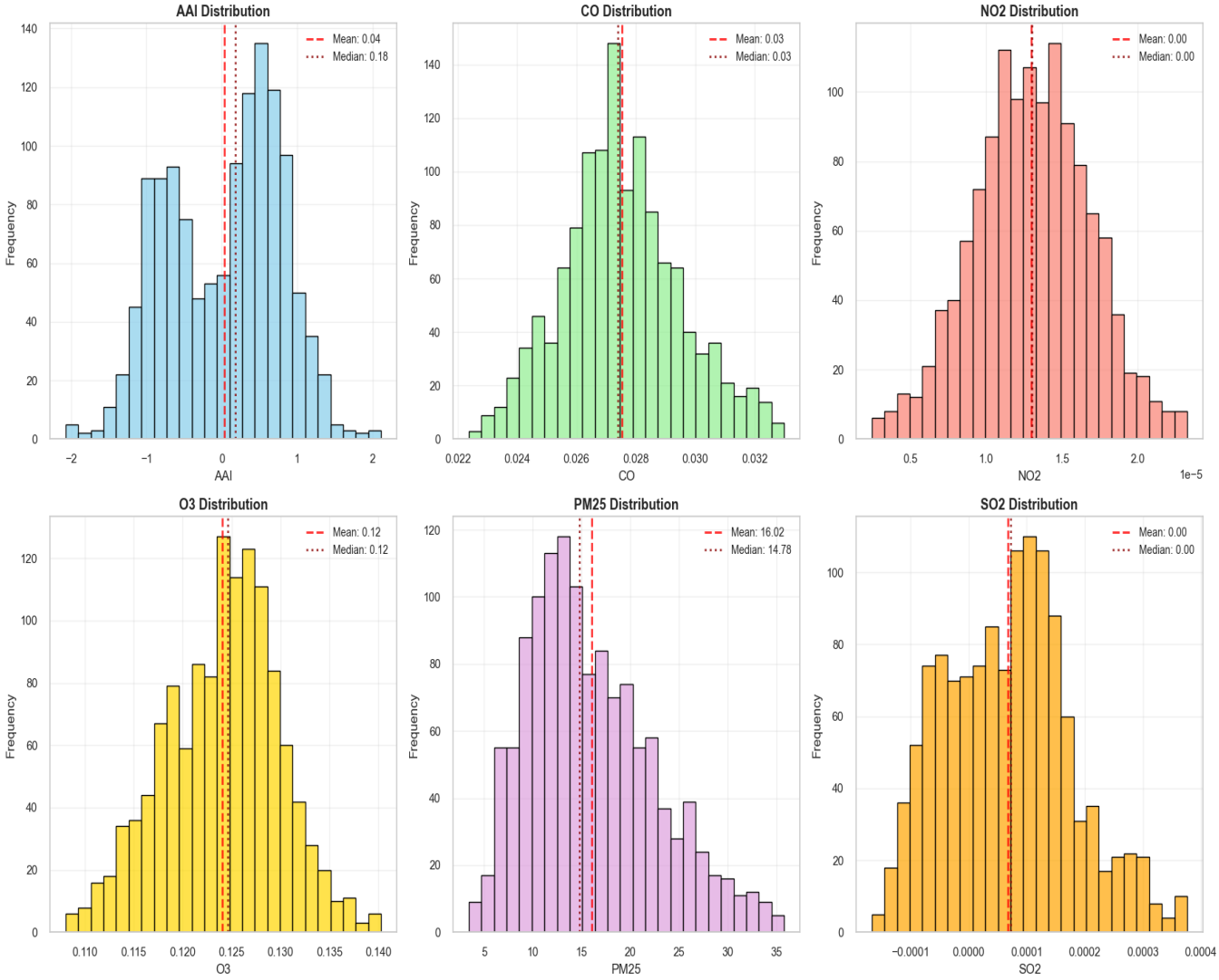
ج- التوزيعات ذات التماثل النسبي:

يُظهر الأوزون (O_3) توزيعاً شبه طبيعي متماثل يتراوح بين 0.11 و0.15 وحدة، مع ذروة واضحة حول 0.125 وحدة. التماثل النسبي والشكل الجرسي يعكسان الطبيعة الثانوية للأوزون وارتباطه بالعمليات الفوتوكيميائية المنتظمة والخلفية الإقليمية. غياب الذيول الطويلة يشير إلى استقرار نسبي في مصادر السلائف وظروف التكوين الفوتوكيميائي. بالمقابل، يُظهر ثاني أكسيد الكبريت (SO_2) توزيعاً متماثلاً نسبياً يتمركز حول الصفر مع انتشار ضيق (-0.0002 إلى 0.0004 وحدة). التوزيع المتماثل والمتمركز حول الصفر يؤكد غياب مصادر انبعاث كبيرة وهيمنة التقلبات العشوائية والخلفية الطبيعية على تراكيز SO_2 (حجازي، ويوسف، 2022).

عموما، التحليل المقارن للتوزيعات يكشف عن ثلاثة أنماط سلوكية متميزة: أولاً، الملوثات الجسيمية (AAI و$PM_{2.5}$) تُظهر توزيعات غير متماثلة تعكس تأثير الأحداث الاستثنائية والتقلبات الموسمية الكبيرة. ثانياً، الغازات ذات الخلفية الإقليمية (CO وO_3) تُظهر توزيعات أكثر تماثلاً وانتظاماً تتسق مع العمليات التدريجية والنقل بعيد المدى. ثالثاً، الغازات المحلية المحدودة (NO_2 وSO_2) تُظهر توزيعات تتراوح بين الانحراف الطفيف والتماثل، مما يعكس محدودية المصادر المحلية مع تأثيرات موضعية متقطعة.

ISSN: 2706-6495

شكل (4) التوزيعات التكرارية للملوثات الجوية فوق محافظة العُلا (2020-2023). تحليل الخصائص الإحصائية لـ AAI وCO وNO₂ وO₃ وPM₂.₅ وSO₂.



المصدر: من إعداد الباحثان بالاعتماد على بيانات القمر الصناعي (Sentinel-5P)- (2020م-2023م)

4.4. التغير الزمني لمؤشر جودة الهواء في محافظة العلا:

مؤشر جودة الهواء (Air Quality Index - AQI) هو نظام رقمي موحد يُستخدم عالمياً لتقييم ونقل مستوى جودة الهواء المحيط للجمهور بشكل مبسط ومفهوم، حيث يتراوح المقياس عادة من 0 إلى 500 ويُقسم إلى فئات ملونة تتدرج من الأخضر للهواء الجيد إلى الأحمر للهواء الخطر (Kumar, 2022). يعتمد حساب المؤشر على تركيز الملوثات الأساسية في الغلاف الجوي مثل الجسيمات المعلقة (PM2.5 وPM10)، وثاني أكسيد النيتروجين، وثاني أكسيد الكبريت، وأول أكسيد الكربون، والأوزون السطحي، ويتم تحديد القيمة النهائية للمؤشر بناءً على الملوث الذي يسجل أعلى قيمة في الوقت المحدد للقياس (Fino et al., 2021). يُعد هذا المؤشر أداة حيوية في السياسات البيئية والصحة العامة، حيث يساعد الأفراد - خاصة ذوي الحساسية التنفسية - على اتخاذ قرارات مدروسة حول الأنشطة الخارجية، كما يوفر للسلطات المختصة بيانات علمية لرصد التلوث ووضع استراتيجيات التحكم في جودة الهواء وتقييم فعالية الإجراءات البيئية المطبقة.

ISSN: 2706-6495

يقدّم شكل (6) سلسلة زمنية لمؤشر جودة الهواء AQI في محافظة العلا خلال الفترة 2020م–2023م. يتضح تذبذب يومي كبير مع قمم متفرقة تصل إلى نحو 183 وحدة، في حين تهبط القيم الدنيا إلى قرابة 12.4 وحدة. خط الاتجاه الخطي المرسوم في الشكل يميل نزولاً بميل −0.0061، ما يعادل تقريباً انخفاضاً بنحو 2 وحدة AQI سنوياً عبر فترة الدراسة. غير أن معامل التحديد $R^2 = 0.0128$ يُظهر أن هذا الاتجاه يفسّر نحو 1.3% فقط من تباين السلسلة، أي أن السلوك العام تحكمه التقلبات اليومية والحدوثات المتطرفة أكثر من أي اتجاه زمني منتظم. بصرياً، يتبدى الاستقرار النسبي مع انخفاض طفيف للغاية، تتخلله ارتفاعات حادة يُحتمل ارتباطها بأحداث عابرة مثل العواصف الغبارية (المطيري وعيد، 2023).

يوضح جدول (5) الإحصاءات الوصفية أن متوسط AQI يساوي 61.41 والوسيط 58.25، مع انحراف معياري 22.89. كون المتوسط أعلى قليلاً من الوسيط يدل على ميل توزيعي إلى اليمين بفعل قمم مرتفعة متقطعة ترفع المتوسط. اتساع المدى بين القيمة الصغرى 12.43 والكبرى 183.00 يبلغ 170.57 وحدة، وهو مدى كبير يتسق مع التشتت الملحوظ في الشكل. إذا ما قيس التباين نسبياً، فإن معامل الاختلاف يساوي نحو 37% (61.41/22.89)، ما يعكس تذبذباً ملحوظاً حول المتوسط. هذه الصورة الإحصائية تدعم ما يظهر في شكل (6) من تشتت كبير مع وجود قيم قصوى قليلة لكنها مؤثرة، في مقابل نواة توزيع تتركز حول مستويات متوسطة تميل إلى الاعتدال.

يبيّن جدول (6) توزيع القراءات على فئات AQI أن الغالبية تقع ضمن المستويات المقبولة: 66.50% معتدل و28.01% جيد. في المقابل، 4.50% من القراءات كانت "غير صحية للأشخاص الحسّاسين" و1.00% "غير صحية"، أي أن نحو 5.5% من القياسات تجاوزت عتبة 100، كما يوضحه شكل (5). بإجمالي 1460 قراءة، فإن عدد التجاوزات فوق 100 يبلغ 80 قراءة (66 + 14)، بينما تبقى 1380 قراءة ضمن النطاق الجيد/المعتدل. هذا التوزيع يتسق مع الوسيط البالغ 58.25، إذ يضع "اليوم النموذجي" داخل نطاق الفئة المعتدلة، ويبيّن أن فترات التدهور النوعي أقلية لكنها موجودة ويجب تحسّبها.

رغم وجود اتجاه تنازلي في السلسلة الزمنية كما يُظهر شكل (17)، فإن معامل التحديد المنخفض ($R^2 = 0.0128$) يُشير إلى أن الاتجاه الخطي يُفسر فقط 1.28% من التباين الكلي في البيانات. هذا يعني أن العوامل الزمنية طويلة المدى ليست المحرك الرئيسي للتغيرات في جودة الهواء، بل إن التقلبات قصيرة المدى والأحداث العابرة - مثل العواصف الترابية والظروف الجوية المؤقتة - تلعب الدور الأكبر في تحديد قيم المؤشر اليومية (الحربي، 2021م).

تتسق النتائج الإحصائية في جدول (5) مع النمط الزمني المُلاحظ في شكل (6)، حيث يُؤكد الوسيط البالغ 58.25 وحدة هيمنة الفئة المعتدلة كما هو مُبين في جدول (6). يُشير معامل الاختلاف البالغ 37.3% (الانحراف المعياري/المتوسط) إلى تذبذب ملحوظ حول المتوسط، وهو ما يتوافق مع التقلبات اليومية الواضحة في الشكل البياني. كما يُؤكد التوزيع الإحصائي وجود قيم شاذة عالية تُفسر الذُرى الحادة المُلاحظة في السلسلة الزمنية، والتي تحدث عادة خلال فترات العواصف الترابية أو الأحداث الجوية الاستثنائية (المطيري وعيد، 2023م).

تُشير النتائج إلى أن جودة الهواء في محافظة العلا خلال الفترة 2020م-2023م تتسم بالاستقرار النسبي مع تحسن طفيف جداً، حيث تقع معظم القراءات ضمن النطاق المقبول صحياً. ومع ذلك، فإن وجود 5.5% من الأيام بمستويات غير صحية يستدعي وضع أنظمة إنذار مبكر وخطط طوارئ للتعامل مع فترات تدهور جودة الهواء، خاصة خلال مواسم العواصف الترابية. كما تُوصي الدراسة بمواصلة الرصد المستمر وتطوير نماذج تنبؤية تأخذ في الاعتبار العوامل الجوية والبيئية المحلية لتحسين إدارة جودة الهواء في المنطقة.

ISSN: 2706-6495

جدول (5): المعاملات الإحصائية لمؤشر جودة الهواء (AQI) للفترة من 2020 – 2023 بمحافظة العلا.

المعامل	القيمة
المتوسط الحسابي	61.41
الوسيط	58.25
الانحراف المعياري	22.89
القيمة الصغرى	12.43
القيمة الكبرى	183.00

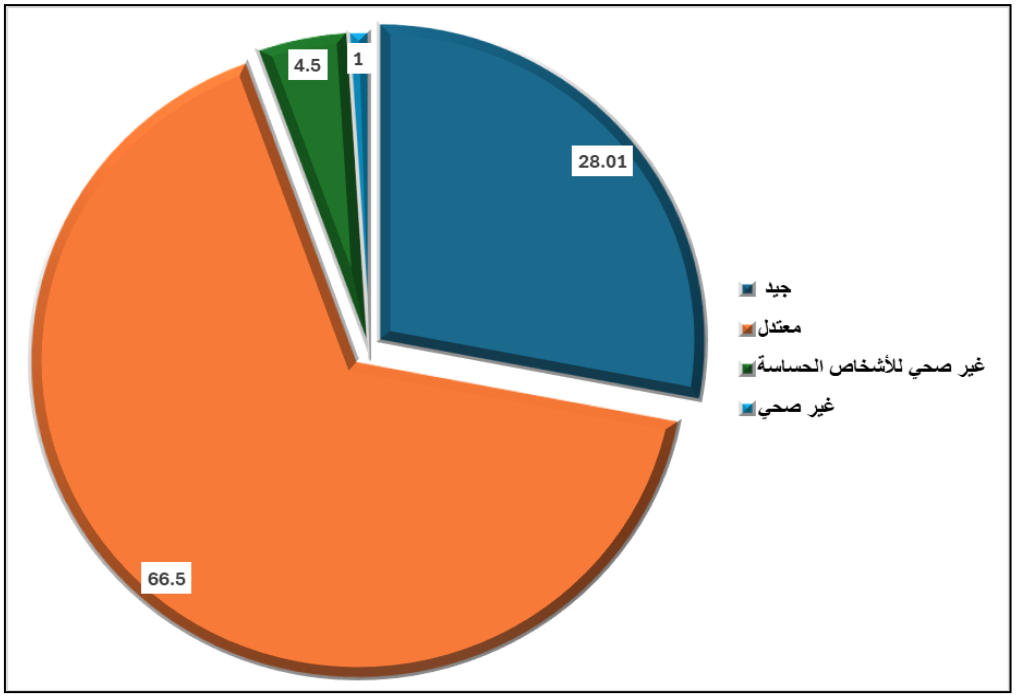
المصدر: من إعداد الباحثان بالاعتماد على بيانات القمر الصناعي (Sentinel-5P)- (2020م-2023م)

جدول (6): عدد ونسبة تصنيفات مؤشر جودة الهواء في محافظة العلا.

فئات مؤشر جودة الهواء	العدد	النسبة المئوية
جيد	409	28.01
معتدل	971	66.50
غير صحي للأشخاص الحساسة	66	4.50
غير صحي	14	1.00

المصدر: من إعداد الباحثان بالاعتماد على بيانات القمر الصناعي (Sentinel-5P)- (2020م-2023م)

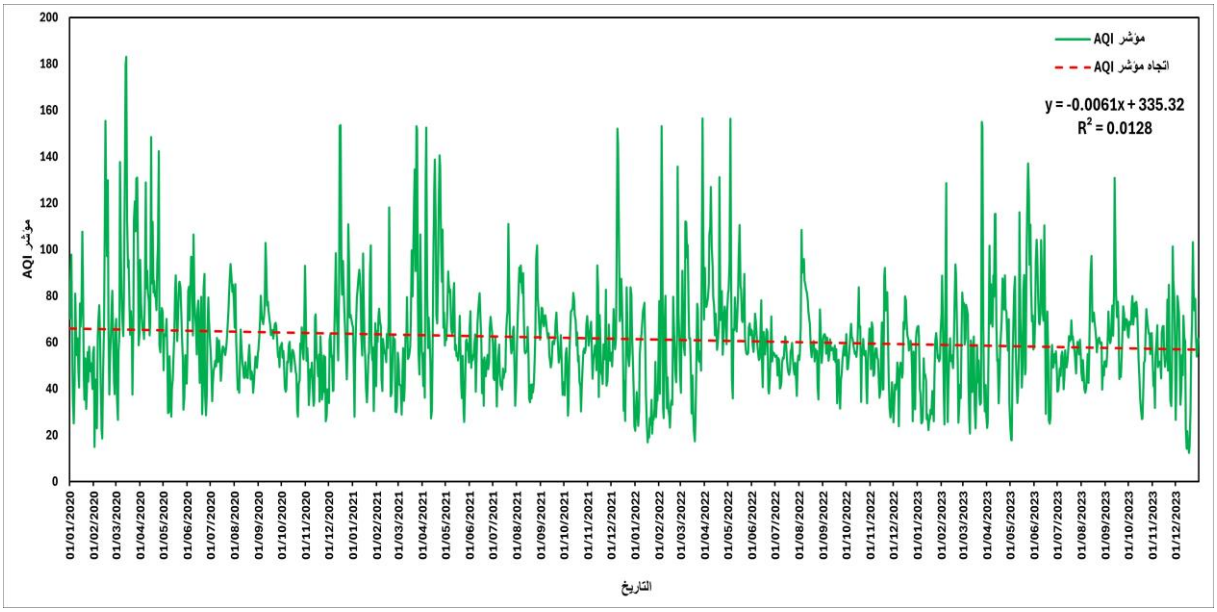
شكل (5): النسبة المئوية لفئات مؤشر جودة الهواء بمحافظة العلا



المصدر: من إعداد الباحثان بالاعتماد على بيانات القمر الصناعي (Sentinel-5P)- (2020م-2023م)

ISSN: 2706-6495

شكل (6): التغير الزمني لمؤشر جودة الهواء AQI بمحافظة العلا للفترة (2020-2023).



المصدر: من إعداد الباحثان بالاعتماد على بيانات القمر الصناعي (Sentinel-5P)- (2020م-2023م)

5. النتائج:

1- الجسيمات الدقيقة (PM2.5) هي الملوث الأكثر تأثيرًا على جودة الهواء في العلا وترتبط ارتباطًا قويًا بمؤشر جودة الهواء AQI.

2- مؤشر امتصاص الهباء الجوي (IAA) أظهر زيادة إحصائية ذات دلالة عالية مع الزمن، مما يدل على تزايد تأثير العواصف الترابية.

3- تم تسجيل توزع مكاني متباين للملوثات بحيث تتركز الجسيمات في الجنوب والجنوب الشرقي وهو مرتبط بمصادر الغبار الريحي.

4- تراكيز أول أكسيد الكربون (CO) كانت أعلى في الأجزاء الشرقية والجنوبية الشرقية، مع تراجع تدريجي نحو الشمال الغربي.

5- تراكيز أكاسيد النيتروجين (NO2) وثاني أكسيد الكبريت (SO2) كانت منخفضة ومستقرة وغير ذات اتجاه زمني واضح، مع توزيع محلي محدود.

6- الجسيمات الدقيقة تظهر توزيعًا شديد الانحراف نحو اليمين مع ذيل طويل لأحداث تلوث شديدة مفاجئة.

7- الأوزون (O3) وأكاسيد الكبريت تظهر توزيعات شبه طبيعية ومتجانسة، تدل على تأثير خلفية فوتوكيميائية.

8- ارتفاعات متقطعة في المؤشرات مثل IAA وPM2.5 المرتبطة بأحداث العواصف الترابية القصيرة الأمد.

9- جودة الهواء في معظم الأيام كانت ضمن فئة جيدة أو معتدلة، مع وجود حوالي 5.5% من الأيام تعد غير صحية للسكان حساسي الوجهة.

10- متوسط مؤشر جودة الهواء AQI للأسرة 61.4 وحدة، الأمر الذي يدل على تحسن نسبي ولكنه لا يغني عن اليقظة في فترات التدهور.

ISSN: 2706-6495

11- علاقة خطية قوية وثابتة بين PM2.5 وAQI بمعامل ارتباط 0.85، ما يؤكد أهمية PM2.5 كمحدد رئيسي لجودة الهواء في المنطقة.

12- ارتباط متوسط بين أول أكسيد الكربون (CO) والجسيمات الدقيقة (PM2.5) يشير إلى وجود مصادر انبعاث مشتركة أو ظروف جوية مماثلة.

13- التغيرات في جودة الهواء محكومة بشكل أكبر بالعوامل الجوية والموسمية أكثر من التغيرات في الانبعاثات المحلية.

14- ثبات تراكيز الغازات المحلية مثل NO2 وSO2 يعكس انعدام أو ضعف المصادر الصناعية في المنطقة.

15- التداخلات الكيميائية في الغلاف الجوي تخلف علاقات ارتباط ضعيفة أو عكسية أحيانًا بين بعض الغازات.

16- شدة تأثير العواصف الترابية تخلق ذُرى حادة تؤثر على جودة الهواء بشكل مؤقت ولكن حاد.

17- التوزيع المكاني للملوثات يعكس تأثير الجغرافيا والطقس، حيث تتركز مناطق التلوث في مناطق معينة وفقًا لرياح وحواجز طبيعية.

18- وجود ذيل طويل بانحراف التوزيع يعني تعرض السكان لمخاطر صحية مرتفعة في أيام معينة مرتفعة التلوث.

6. التوصيات:

في ضوء ما توصل له البحث من نتائج يقدم الباحثان التوصيات التالية:

1- ارتفاع مؤشر امتصاص الهباء الجوي (IAA) يشير إلى زيادة العواصف الترابية. بالتالي يجب تطوير أنظمة إنذار مبكر لتحذير السكان من تأثيرها المتزايد.

2- الجسيمات الدقيقة (PM2.5) تشكل المؤثر الأكبر على جودة الهواء حسب الارتباط القوي مع مؤشر AQI. لذا ينبغي تركيز الرقابة والإجراءات على تقليل انبعاثاتها.

3- وجود تركيزات مرتفعة للغبار في الجنوب والجنوب الشرقي للعلا يدل على تأثير العواصف الترابية القادمة من المناطق الصحراوية. لذلك، يوصى بزراعة أحزمة خضراء واستخدام وسائل لتثبيت التربة للحد من الانبعاثات الترابية.

4- تواجد تراكيز مرتفعة قليلاً لـ CO في الشرق والجنوب الشرقي يُشير إلى تأثير النقل الجوي الإقليمي. يجب رفع كفاءة أنظمة النقل لتقليل انبعاثات أول أكسيد الكربون.

5- استقرار نسب تركيزات NO2 و SO2وانتشارها المحدود يشير لانخفاض مصادر التلوث المحلي. يفضل متابعة هذه المصادر لمنع أي زيادة مستقبلية.

6- الذروات الحادة في PM2.5 مرتبطة بأحداث عواصف ترابية متقطعة، مما يؤكد ضرورة توفير تحذيرات صحية وأدوات حماية للسكان خلال هذه الفترات.

7- جودة الهواء في أغلب الأيام ضمن فئات جيدة أو معتدلة، ولكن تجاوزات غير صحية لأيام بنسبة 5.5% تستوجب وضع خطط طوارئ للتعامل مع ارتفاع التلوث.

8- متوسط AQI مرتفع نسبيًا (61.41) مع احتمالية ارتفاع مفاجئ يدل على أهمية المراقبة المستمرة وتحديث السياسات البيئية.

9- الارتباط الملحوظ بين PM2.5 وCO يدل على إمكانية تحسين السياسات من خلال استهداف مصادر الاحتراق وتنظيمها.

10- عدم وجود اتجاهات زمنية واضحة للملوثات الغازية مثل NO2 وSO2 يؤكد أن تقلبات الظروف الجوية مهمة في تفسير تغييراتها، ما يدل على أهمية تكامل الرصد المناخي مع الرصد البيئي.

11- الذيل الطويل في توزيع PM2.5 يظهر خطورة التعرض لفترات تلوث مرتفعة قصيرة ولكنها حادة تستلزم حماية خاصة للفئات الحساسة.

12- التوزيع المكاني للملوثات يؤكد ضرورة تخصيص الموارد والتركيز على مناطق تجمع التلوث العالية.

13- العوامل الطبوغرافية والرياح المحلية تؤثر بشكل قوي على توزيع الملوثات، مما يتطلب دراسات ميدانية مكملة لتحديد المناطق الأشد تأثراً.

14- تعزيز تدريب العاملين في مجال الرصد البيئي لضمان تحسين جودة البيانات وتطبيقات النماذج.

15- زيادة عدد محطات الرصد الأرضية لزيادة دقة التحليل والمراقبة اللحظية.

16- تحسين إطلاع ووعي السكان بكيفية حماية أنفسهم خلال الفترات عالية التلوث، مثل استخدام الكمامات الواقية.

17- تطوير تشريعات بيئية صارمة لضبط الانبعاثات من المركبات والمصانع التي تسهم في تكوين الجسيمات الدقيقة.

18- استحداث برامج توعية وتثقيفية مستمرة حول مخاطر تلوث الهواء وأهمية الحفاظ على البيئة.

19- دعم تشجير المناطق الحضرية وتطوير البنى التحتية الخضراء لتخفيف أثر الغبار المعلق.

20- وضع خطط طوارئ بيئية متكاملة للتعامل مع حالات التلوث الحادة المستجدة.

21- توسيع التعاون مع الجهات الدولية للاستفادة من الخبرات وأحدث التقنيات في مراقبة وتحسين جودة الهواء.

7. المراجع:

1.7. المراجع العربية:

العنزي، زبن معزي صالح 1416 هـ. (1995) **معجم وتاريخ القرى في وادي القرى**، الرياض.

الحربي، منى سالم محمد. (2021). **أثر المناخ على السياحة في محافظة العلا باستخدام نظم المعلومات الجغرافية**. مجلة جامعة أم القرى للعلوم الاجتماعية، مج13, ع2، 759 - 798.

السلطان، تهاني عبد العزيز إبراهيم. (2008) **تلوث الهواء في مدينة الجبيل في المنطقة الشرقية في المملكة العربية السعودية في الفترة 1998-2006 م**، رسالة ماجستير، كلية الآداب، جامعة الملك سعود، الرياض.

الفقير، بدر بن عادل. (2009) **الطبيعية والآثار في محافظة العلا جوهرة سياحية.**

القحطاني، مرعي بن حسين محمد. (2009) **تلوث الهواء في منطقة أبها الحضرية** (منطقة عسير جنوب غربي المملكة العربية السعودية) جامعة الكويت، مجلة دراسات الخليج والجزيرة العربية، العدد 134.

-العباد، هدى عبد الله، (2012) **أثر العواصف في جودة الهواء ومدلولاتها على صحة الأنسان في المنطقة الشرقية بالمملكة العربية السعودية**، مجلة كلية الآداب، جامعة الأميرة نورة بنت عبد الرحمن.

الظفيري، سلطان وبدان رومي. (2015) **التقييم البيئي المتكامل لجودة الهواء لمحافظة الأحمدي في دولة الكويت** (رسالة ماجستير غير منشورة). جامعة الخليج العربي، المنامة.

العلياني، سعيد سعد زاهر. (2016). **تقييم جودة الهواء في مدينة الجبيل الصناعية بالمملكة العربية السعودية**. (رسالة ماجستير غير منشورة). جامعة الخليج العربي، المنامة.

الغامدي، خالد بن عبد الرحمن احمد. (2016) **الرياح وجودة الهواء في مدينة مكة المكرمة والمشاعر المقدسة.** جامعة الكويت، المجلة المصرية للتغير البيئي، مج 9، ع 1.

الغبيشي، زياد شامي جابر. (2021). **تلوث الهواء بمدينة ينبع الصناعية دراسة في جُغرافيَّة البيئة**، رسالة ماجستير منشورة، كلية الآداب والعلوم والإنسانية، جامعة طيبة.

المطيري، نورة عبدالله سويلم، وعيد، محمد عيد موسى. (2023). **العواصف الرملية والغبارية في منطقة المدينة المنورة: دراسة في الجغرافيا المناخية**. رسائل جغرافية، الرسالة 514، 3 - 75.

حجازي، عبدالفتاح السيد عبدالفتاح، ويوسف، وليد شكري عبدالحميد. (2022). **نموذج الملاءمة المكانية للتنمية العمرانية بمدينة العلا -المملكة العربية السعودية**: دراسة باستخدام تقنيات نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد. المجلة العلمية لكلية الآداب، مج25, ع83، 569 - 672.

عبد القادر، رائد عبد القادر، (2022) **رصد ومراقبة تلوث الهواء في محافظة صلاح الدين باستخدام القمر الصناعي sentinel-5**، مجلة جامعة تكريت للعلوم الانسانية، المجلد (29)، العدد (10)، الجزء الاول.

محمد، صالحة موسى أبكر. (2018) **التباين المكاني لتلوث الهواء بمدينة مكة المكرمة**، رسالة ماجستير، جامعة طيبة، المدينة المنورة.

2.7. المراجع الأجنبية:

Alsubhi, A. S., & data. International Journal of Remote Sensing, 1-25.

Amann, M., Klimont, Z., & Wagner, F. (2013). Regional and global emissions of air pollutants: recent trends and future scenarios. Annual review of environment and resources, 38, 31-55.

Chin, M., Diehl, T., Ginoux, P., & Malm, W. (2007). Intercontinental transport of pollution and dust aerosols: implications for regional air quality. Atmospheric Chemistry and Physics, 7(21), 5501-5517.

Fino, A., Vichi, F., Leonardi, C., & Mukhopadhyay, K. (2021). An overview of experiences made and tools used to inform the public on ambient air quality. Atmosphere, 12(11), 1524.

Habibullah, Turki Mohammed, & Dorlink, Steve (2013) The impact of weather on air quality for urban cities in the UK. Journal of Arab Sciences and Humanities, vol. 7, p. 1, 51-62.

Hoffmann, C., Funk, R., Wieland, R., Li, Y., & Sommer, M. (2008). Effects of grazing and topography on dust flux and deposition in the Xilingele grassland, Inner Mongolia. Journal of arid environments, 72(5), 792-807.

Jenkin, M. E., & Clemitshaw, K. C. (2000). Ozone and other secondary photochemical pollutants: chemical processes governing their formation in the planetary boundary layer. Atmospheric Environment, 34(16), 2499-2527.

ISSN: 2706-6495

Knippertz, P., Hamza, I., Kassimou, A., Laurent, B., Orji, B. N., Osika, D. P., ... & Fink, A. (2017). Dust. Meteorology of Tropical West Africa: The Forecasters' Handbook, 175-203.

Kumar, P. (2022). A critical evaluation of air quality index models (1960–2021). Environmental Monitoring and Assessment, 194(5), 1-45.

Kwok, R. H. F., Baker, K. R., Napelenok, S. L., & Tonnesen, G. S. (2015). Photochemical grid model implementation and application of VOC, NO x, and O 3 source apportionment. Geoscientific Model Development, 8(1), 99-114.

Seham S. Al-Alola,Oter,(2022), Air quality estimation using remote sensing and GIS-spatial technologies along Al Shamal train pathway, Al-Qurayyat City in Saudi Arabia, Environmental and Sustainability Indicators,p 4.

Lu, X., Zhang, L., & Shen, L. (2019). Meteorology and climate influences on tropospheric ozone: a review of natural sources, chemistry, and transport patterns. Current Pollution Reports, 5(4), 238-260.

Madany, I. M., & Danish, S. (1993). Spatial and temporal patterns in nitrogen dioxide concentrations in a hot desert region. Atmospheric Environment. Part A. General Topics, 27(15), 2385-2391.

Modaihsh, A. S., Al-Barakah, F. N., Nadeem, M. E., & Mahjoub, M. O. (2015). Spatial and temporal variations of the particulate matter in Riyadh City, Saudi Arabia. Journal of Environmental Protection, 6(11), 1293.

Wang, X., Chen, X., Ma, B., Zhou, Z., & Peng, C. (2024). Observed vertical dispersion patterns of particulate matter in urban street canyons and dominant influencing factors. Forests, 15(8), 1319.

Yarmohamadi, M., Alesheikh, A. A., Sharif, M., & Vahidi, H. (2023). Predicting dust-storm transport pathways using a convolutional neural network and geographic context for impact adaptation and mitigation in urban areas. Remote Sensing, 15(9), 2468.

جميع الحقوق محفوظة © 2026، الباحث/ زياد بن شامي جابر الغبيشي، الأستاذ الدكتور/ حسين أحمد عذاب المحمد،
المجلة الأكاديمية للأبحاث والنشر العلمي (CC BY NC)

Doi: http://doi.org/10.52132/Ajrsp/v7.81.14