**Albahit Journal of Applied Sciences**
*"open-access, peer-reviewed biannual journal"*
*eISSN: 2708-8936, pISSN: 2708-244X*
*Volume 5, Issue 2, 2026*
*Page No: 155-172*
***Website***: *https://albahitjas.com.ly/index.php/albahit/en/index*

# Chemical Characterization and Health Risk Assessment of Fine Particulate Matter (PM2.5) in Western Libya

**Hussameddin S. EM. Sharif [1*] ,Wafa Salim Saleem Hammoudah [2]**
[1,2] Department of Chemistry, Faculty of Education Zuwara, University of Zawia, Libya.
[*]*Corresponding author:* h.sharif@zu.edu.ly

| **Received:** 25-02-2026 | **Accepted:** 27-04-2026 | **Published:** 10-05-2026 |
|---|---|---|

**Copyright:** © 2026 by the authors. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

**Abstract:**

This study aimed to chemically characterize fine particulate matter (PM2.5) in western Libyan cities, assess its spatial and temporal variability, and examine its association with aggregated health indicators related to asthma and cardiovascular diseases. Four cities with different environmental settings were investigated: Tripoli, Al-Zawiya, Sabratha, and Zuwara. A total of 72 PM2.5 samples were collected over six selected months during 2025 and 2026. PM2.5 mass concentrations were determined gravimetrically, while sulfate, nitrate, and selected heavy metals (Cd, Pb, and Ni) were chemically analyzed. Meteorological data and aggregated health records were used to support the environmental and health interpretation of the results.

The overall mean PM2.5 concentration was 40.57 ± 13.22 µg/m³. Al-Zawiya recorded the highest mean concentration (56.99 ± 10.40 µg/m³), whereas Sabratha showed the lowest mean level. Al-Zawiya also exhibited the highest concentrations of sulfate, nitrate, Cd, Pb, and Ni, indicating the influence of industrial and traffic-related sources. Dust events and Ghibli winds were associated with elevated PM2.5 levels. Strong positive correlations were observed between monthly PM2.5 averages and population-adjusted asthma and cardiovascular disease rates per 100,000 inhabitants. However, these associations should be interpreted as ecological correlations rather than evidence of direct individual-level causality.

**Keywords**: PM2.5; Western Libya; chemical characterization; sulfate; nitrate; heavy metals; asthma; cardiovascular diseases.

# التوصيف الكيميائي وتقييم المخاطر الصحية للجسيمات الدقيقة العالقة ذات القطر الديناميكي الهوائي الذي لا يتجاوز 2.5 ميكرومتر في غرب ليبيا

**حسام الدين صالح امحمد الشريف [1*] ، وفاء سالم سليم حموده [2]**
[2،1] قسم الكيمياء، كلية التربية- زوارة، جامعة الزاوية، ليبيا.

**الملخص**

تهدف هذه الدراسة إلى توصيف التركيب الكيميائي للجسيمات الدقيقة العالقة PM2.5 في مدن غرب ليبيا، وتقييم تباينها المكاني والزماني، وارتباطها بالمؤشرات الصحية المجمعة لحالات الربو وأمراض القلب. شملت الدراسة أربع مدن ذات خصائص بيئية مختلفة، هي طرابلس، الزاوية، صبراته، وزوارة، وتم تحليل 72 عينة PM2.5 جمعت خلال ستة أشهر مختارة من عامي 2025 و2026. تم تحديد التركيز الكتلي للجسيمات بطريقة القياس الوزني، وتحليل الكبريتات والنترات والمعادن الثقيلة Cd و Pb وNi، مع استخدام بيانات الأرصاد الجوية والمؤشرات الصحية المجمعة في التفسير البيئي والصحي.

أظهرت النتائج أن المتوسط العام لـ PM2.5 بلغ 40.57 ± 13.22 µg/m³ ، وكانت الزاوية الأعلى تركيزا بمتوسط 56.99 ± 10.40 µg/m³ ، بينما سجلت صبراته أدنى متوسط. كما سجلت الزاوية أعلى تراكيز للكبريتات والنترات والمعادن الثقيلة، مما يشير إلى تأثير المصادر الصناعية والمرورية. وارتبطت حالات الغبار ورياح القبلي بارتفاع متوسطات PM2.5. كما

أظهرت النتائج ارتباطا موجبا قويا بين متوسطات PM2.5 الشهرية ومعدلات الربو وأمراض القلب لكل 100,000 نسمة، مع تفسير هذه العلاقة بوصفها ارتباطا بيئيا لا دليلا سببيا مباشرا.

**الكلمات المفتاحية:** غرب ليبيا، التوصيف الكيميائي، الكبريتات، النترات، المعادن الثقيلة، الربو، أمراض القلب.

**مقدمة:**

تُعد الجسيمات الدقيقة العالقة $PM_{2.5}$ من أهم ملوثات الهواء ذات الأهمية الكيميائية والصحية، نظرًا لصغر حجمها، ومساحتها السطحية النسبية العالية، وقدرتها على حمل مكونات كيميائية مختلفة، إضافة إلى إمكانية وصولها إلى الأجزاء العميقة من الجهاز التنفسي (Goodarzi et al., 2023)، وتكتسب دراسة PM2.5 أهمية خاصة لأنها لا تمثل كتلة جسيمية فقط، بل نظامًا كيميائيًا معقدًا يتكون من أيونات ثانوية مثل الكبريتات ($SO_4^{2-}$) والنترات($NO_3^-$) ، إضافة إلى عناصر فلزية نزرة قد تشمل الكادميوم والرصاص والنيكل، وهي مكونات ترتبط غالبًا بمصادر الاحتراق، والنشاط الصناعي، والانبعاثات المرورية، وإعادة تعليق الغبار الحضري والصناعي.

تشير الإرشادات الحديثة لمنظمة الصحة العالمية إلى أن التعرض للجسيمات الدقيقة، حتى عند تراكيز منخفضة نسبيًا، يرتبط بآثار صحية ضارة، خصوصًا على الجهازين التنفسي والقلبي الوعائي (World Health Organization, 2021). كما بينت الأدبيات الوبائية والسمية أن PM2.5 قد تسهم في تفاقم أمراض القلب والأوعية الدموية من خلال آليات تشمل الالتهاب الجهازي، والإجهاد التأكسدي، واضطراب الوظيفة البطانية، والتأثيرات العصبية الذاتية (Brook et al., 2010).

في غرب ليبيا، تمثل مدن طرابلس والزاوية وصبراته وزوارة بيئات حضرية وصناعية وساحلية متباينة من حيث مصادر الانبعاثات وظروف التشتت الجوي. وتظهر بيانات هذه الدراسة أن رصد PM2.5 في هذه المدن، إلى جانب توصيف مكوناته الكيميائية من الكبريتات والنترات والمعادن الثقيلة، يوفر أساسًا علميًا لفهم الفروق المكانية والزمانية في التلوث الجسيمي. كما أن دمج القياسات الكيميائية مع المؤشرات الصحية المجمعة، مثل زيارات الربو وأمراض القلب، يسمح بتقييم بيئي–صحي أولي لمخاطر PM2.5 في المنطقة، مع الحفاظ على التفسير العلمي الحذر بوصف العلاقة ارتباطية وليست سببية مباشرة.

**مشكلة الدراسة**

تتمثل مشكلة الدراسة في نقص البيانات الكيميائية المحلية حول مستويات الجسيمات الدقيقة العالقة PM2.5 وتركيبها في مدن غرب ليبيا، رغم اختلاف طبيعة مصادر التلوث بين طرابلس الحضرية، والزاوية الصناعية، وصبراته وزوارة الساحليتين. ولا تكفي الكتلة الكلية لـ PM2.5 وحدها لتقدير خطورة هذه الجسيمات، إذ ترتبط دلالتها البيئية والصحية بمكوناتها الكيميائية، خاصة الكبريتات والنترات والمعادن الثقيلة مثل Cd و Pbو .Ni كما تبرز الحاجة إلى فهم العلاقة بين هذه التراكيز والمؤشرات الصحية المجمعة المرتبطة بالربو وأمراض القلب.

وعليه، يتمثل السؤال الرئيسي للدراسة في الآتي:

**ما الخصائص الكيميائية للجسيمات الدقيقة PM2.5 في مدن غرب ليبيا، وما مدى ارتباطها بالمؤشرات الصحية المجمعة لحالات الربو وأمراض القلب؟**

وتنبثق عن هذا السؤال الأسئلة الفرعية الآتية:

1. ما مستويات PM2.5 ومكوناتها الكيميائية من الكبريتات والنترات والمعادن الثقيلة في طرابلس والزاوية وصبراته وزوارة؟
2. هل تختلف تراكيز PM2.5 ومكوناتها الكيميائية بين المدن تبعًا لاختلاف طبيعة الموقع الحضري أو الصناعي أو الساحلي؟
3. ما طبيعة العلاقة بين تراكيز PM2.5 والمؤشرات الصحية المجمعة لحالات الربو وأمراض القلب خلال فترة الدراسة؟

**أهداف الدراسة**

**الهدف الرئيسي**

تهدف هذه الدراسة إلى توصيف التركيب الكيميائي للجسيمات الدقيقة العالقة PM2.5 في مدن غرب ليبيا، وتقييم تباين مستوياتها بين المواقع الحضرية والصناعية والساحلية، مع دراسة ارتباطها بالمؤشرات الصحية المجمعة لحالات الربو وأمراض القلب خلال فترة الدراسة.

**الأهداف الفرعية**

1. تحديد تراكيز PM2.5 ومكوناتها الكيميائية، المتمثلة في الكبريتات والنترات والمعادن الثقيلة Cd و Pb وNi، في مدن طرابلس والزاوية وصبراته وزوارة.
2. مقارنة التباين المكاني والزماني لتراكيز PM2.5 ومكوناتها الكيميائية بين المدن الأربع وفق طبيعة الموقع ومصادر الانبعاث المحتملة.
3. تحليل العلاقة بين تراكيز PM2.5 والمؤشرات الصحية المجمعة المرتبطة بحالات الربو وأمراض القلب، مع تفسير هذه العلاقة بوصفها ارتباطًا بيئيًا لا دليلًا سببيًا مباشرًا.

**فرضيات الدراسة**

تنطلق الدراسة من فرضية رئيسية مفادها أن التركيب الكيميائي للجسيمات الدقيقة العالقة PM2.5 في مدن غرب ليبيا يختلف تبعًا لطبيعة الموقع ومصادر الانبعاث المحتملة، وأن هذا الاختلاف قد ينعكس في صورة ارتباطات بيئية مع المؤشرات الصحية المجمعة المرتبطة بالربو وأمراض القلب.

وبناءً على ذلك، صيغت الفرضيات الفرعية الآتية:

1. توجد فروق ذات دلالة إحصائية في تراكيز PM2.5 بين مدن الدراسة الأربع، نتيجة لاختلاف الخصائص الحضرية والصناعية والساحلية لكل موقع.
2. تختلف تراكيز المكونات الكيميائية لـPM2.5 ، وخاصة الكبريتات والنترات والمعادن الثقيلة Cd و Pb وNi، بين المدن المستهدفة، مع توقع ارتفاع نسبي في المواقع ذات التأثير الصناعي والمروري مقارنة بالمواقع الساحلية الأقل كثافة في مصادر الانبعاث.
3. توجد علاقة ارتباطية موجبة بين ارتفاع تراكيز PM2.5 والمؤشرات الصحية المجمعة لحالات الربو وأمراض القلب خلال فترة الدراسة، مع تفسير هذه العلاقة في إطار بيئي إحصائي دون اعتبارها دليلًا مباشرًا على السببية الفردية.

**أهمية الدراسة**

تنبع الأهمية العلمية لهذه الدراسة من أنها تقدم توصيفًا كيميائيًا للجسيمات الدقيقة العالقة PM2.5 في منطقة لا تزال فيها البيانات المنشورة حول هذا النوع من التلوث محدودة، خاصة في مدن غرب ليبيا ذات الخصائص البيئية المتباينة. إذ لا تقتصر الدراسة على قياس الكتلة الكلية للجسيمات، بل تمتد إلى تحليل مكوناتها الكيميائية، بما في ذلك الكبريتات والنترات والمعادن الثقيلة Cd و PbوNi، الأمر الذي يسهم في فهم طبيعة مصادر التلوث ودلالاته الكيميائية والبيئية. كما تضيف الدراسة بعدًا بيئيًا–صحيًا من خلال فحص العلاقة بين تراكيز PM2.5 والمؤشرات الصحية المجمعة المرتبطة بالربو وأمراض القلب.

أما من الناحية العملية، فتكتسب الدراسة أهميتها من قدرتها على توفير بيانات محلية قابلة للاستخدام في دعم برامج مراقبة جودة الهواء، وتحديد المواقع الأعلى تعرضًا للتلوث الجسيمي، وتوجيه إجراءات الحد من الانبعاثات الصناعية والمرورية في المدن المستهدفة. كما يمكن أن تسهم نتائجها في مساعدة الجهات البيئية والصحية على تطوير خطط وقائية تستهدف الفئات الأكثر حساسية، وبناء قاعدة علمية أولية لربط الرصد الكيميائي للهواء بالمؤشرات الصحية العامة في غرب ليبيا.

**الدراسات السابقة**

تناولت العديد من الدراسات الحديثة تلوث الهواء بالجسيمات الدقيقة PM2.5 من زوايا مختلفة، شملت قياس التراكيز الكتلية، وتحليل التركيب الكيميائي، وتقييم المخاطر الصحية، ودراسة تأثير المصادر

الحضرية والصناعية والساحلية. وتكتسب هذه الدراسات أهمية خاصة في دعم الدراسة الحالية، لأنها توفر أساسا علميا للمقارنة مع نتائج PM2.5 ومكوناته الكيميائية في مدن غرب ليبيا.

على المستوى الإقليمي، قدم Schwela (2024) مراجعة شاملة لتلوث الجسيمات العالقة وآثاره الصحية في ست دول شمال أفريقية، شملت ليبيا. أوضحت الدراسة أن مصادر الجسيمات في المنطقة تتوزع بين النقل، والأنشطة الصناعية، والعواصف الترابية والرملية، كما أكدت أن سمية PM2.5 لا تعتمد فقط على حجم الجسيمات، بل على تركيبها الكيميائي وقدرتها على حمل المعادن والمركبات السامة إلى الجهاز التنفسي. وأشارت المراجعة أيضا إلى محدودية بيانات الرصد الأرضي المنتظم في ليبيا، وضعف التشريعات والمعايير الخاصة بالجسيمات الدقيقة، وهو ما يبرز الحاجة إلى دراسات ميدانية كيميائية أكثر تفصيلا.

وفي السياق الليبي، درس Fares et al. (2024) جودة الهواء في مدينتي طرابلس وزليتن خلال الفترة من يوليو إلى ديسمبر 2023، بالاعتماد على مؤشرات AQI و PM2.5وPM10وبعض المتغيرات الجوية. أظهرت الدراسة أن أعلى مستويات AQI و PM2.5وPM10سجلت في شهر نوفمبر، وأن جودة الهواء صنفت خلال هذا الشهر على أنها غير صحية للفئات الحساسة، بينما كانت بقية الفترات غالبا ضمن المستوى المتوسط. وتعد هذه الدراسة مهمة للدراسة الحالية لأنها توفر دليلا حديثا على وجود تذبذب زمني في PM2.5 في شمال غرب ليبيا، إلا أنها لم تتناول التركيب الكيميائي للجسيمات أو محتواها من الأيونات والمعادن الثقيلة.

أما من الناحية الكيميائية المحلية، فقد أجرى Busheina et al. (2017) دراسة حول الجسيمات العالقة الكلية TSP والعناصر النزرة في مدينة الزاوية، باستخدام القياس الوزني والهضم الحمضي والتحليل بتقنية ICP-OES. أظهرت الدراسة أن تراكيز TSP والعناصر النزرة كانت أعلى قرب المواقع المتأثرة بالمرور والنشاط الصناعي، خاصة بالقرب من الطريق الساحلي ومحطة الكهرباء والمصفاة، وجاء ترتيب العناصر في الجسيمات العالقة على النحو Al > Fe > Pb > Mn. ورغم أن الدراسة تناولت TSP وليسPM2.5 ، فإن أهميتها تكمن في أنها تقدم دليلا محليا على البصمة المعدنية للتلوث الجسيمي في الزاوية، وهي من أهم مواقع الدراسة الحالية.

وفي نطاق المصادر الصناعية الساحلية، درس Okasha and Alhuweemdi (2019) تأثير انبعاثات ثاني أكسيد الكبريت من مجمع مليته للنفط والغاز على جودة الهواء في زوارة وصبراته والجميل باستخدام نمذجة انتشار الملوثات. أظهرت الدراسة أن SO2 يمكن أن يصل إلى المدن المجاورة بتراكيز مرتفعة نسبيا تبعا لاتجاه الرياح. وتعد هذه الدراسة مهمة للدراسة الحالية لأنها لا تقيس PM2.5 مباشرة، لكنها تفسر احتمالية مساهمة SO2 كمادة غازية سابقة في تكوين الكبريتات داخل الجسيمات الدقيقة، خصوصا في المدن الساحلية القريبة من مجمع مليته.

وفي دراسة حديثة من شمال أفريقيا، حلل Shetaya et al. (2024) التباين المكاني والزماني لـ PM2.5 والمعادن/أشباه المعادن المرتبطة بها في القاهرة الكبرى، مع مقارنة موقع حضري وآخر صناعي وتقييم المخاطر الصحية. أظهرت الدراسة أن متوسط PM2.5 كان أعلى في الموقع الصناعي مقارنة بالموقع الحضري، وأن التركيب الكيميائي للجسيمات تأثر باستخدامات الأرض والأنشطة المحلية أكثر من تأثره بالعوامل الجوية وحدها. كما بينت الدراسة أن المعادن المرتبطة بـ PM2.5 قد تسهم في مخاطر صحية غير سرطانية وسرطانية. وتفيد هذه الدراسة في دعم المقارنة بين طرابلس كموقع حضري والزاوية كموقع صناعي/مروري في الدراسة الحالية.

وفي بيئة متوسطية ساحلية مشابهة جزئيا، أجرى Fakhri et al. (2023) توصيفا كيميائيا شاملا لـ PM2.5في بيروت، شمل الأيونات غير العضوية والعناصر والمركبات الكربونية والعضوية. أوضحت الدراسة أن PM2.5 في المدن الساحلية المتوسطية يتأثر بتداخل المصادر المحلية مثل المرور ومولدات الديزل وإعادة تعليق الغبار، مع النقل الإقليمي والعواصف الغبارية. وتعد هذه الدراسة مفيدة للدراسة الحالية لأنها تدعم تفسير دور الكبريتات والنترات والنيكل وبعض العناصر النزرة في PM2.5 داخل البيئات الساحلية والحضرية المتأثرة بالبحر المتوسط.

كما قيم Kebe et al. (2025) مخاطر التعرض لـ PM10 و PM2.5والمعادن الثقيلة في منطقتين حضريتين في داكار، إحداهما صناعية والأخرى ساحلية/حضرية. ركزت الدراسة على قياس المعادن الثقيلة المرتبطة بالجسيمات وتقييم المخاطر الصحية باستخدام مؤشرات مثل معامل الخطر ومؤشر الخطر والخطر السرطاني. وتكمن أهمية هذه الدراسة بالنسبة إلى البحث الحالي في أنها تقدم نموذجا مقارنا حديثا لدراسة المواقع الصناعية والساحلية معا، وتؤكد أن المدن الساحلية قد تتعرض لمستويات ملحوظة من PM2.5والمعادن الثقيلة عندما تتداخل المصادر المرورية والصناعية والغبارية.

يتضح من الدراسات السابقة أن معظم الدراسات الليبية المتاحة ركزت إما على القياس الكتلي للجسيمات أو جودة الهواء العامة، أو على جسيمات TSP والمعادن في موقع محدد، أو على ملوثات غازية مثل SO2. في المقابل، توفر الدراسات الإقليمية والدولية إطارا أوسع لفهم أهمية التوصيف الكيميائي لـ PM2.5 وتقييم مخاطره الصحية. وبناء على ذلك، تتميز الدراسة الحالية بأنها تجمع بين قياسPM2.5 ، وتحليل مكوناته الكيميائية من الكبريتات والنترات والمعادن الثقيلة Cd و PbوNi، ومقارنة مواقع حضرية وصناعية وساحلية في غرب ليبيا، مع ربط النتائج بالمؤشرات الصحية المجمعة المرتبطة بالربو وأمراض القلب.

## المواد والطرق

### تصميم الدراسة

تم تصميم هذه الدراسة بوصفها دراسة رصدية كيميائية بيئية ذات بعد مكاني وزماني، بهدف توصيف تراكيز الجسيمات الدقيقة العالقة PM2.5 ومكوناتها الكيميائية في عدد من مدن غرب ليبيا، مع فحص ارتباطها بالمؤشرات الصحية المجمعة المرتبطة بأمراض الجهاز التنفسي والقلب. شملت الدراسة أربع مدن تمثل أنماطا بيئية مختلفة من حيث طبيعة مصادر الانبعاث، وهي طرابلس كموقع حضري/مروري، والزاوية كموقع صناعي/مروري، وصبراته كموقع ساحلي شبه حضري، وزوارة كموقع ساحلي قد يتأثر بالأنشطة الصناعية والغازية في نطاق مجمع مليته تبعا لاتجاه الرياح.

### مواقع الدراسة

تم اختيار مواقع أخذ العينات بحيث تعكس التباين المكاني في مصادر PM2.5 بين المدن المستهدفة. مثل موقع طرابلس بيئة حضرية ذات كثافة مرورية وسكانية، بإحداثيات تقريبية بلغت 32.887 شمالا و13.191 شرقا. ومثل موقع الزاوية بيئة صناعية/مرورية متأثرة بمصادر محتملة مثل المصفاة ومحطة الكهرباء والطريق الساحلي، بإحداثيات 32.755 شمالا و12.727 شرقا. أما موقع صبراته فمثل بيئة ساحلية شبه حضرية عند 32.793 شمالا و12.485 شرقا، في حين مثل موقع زوارة بيئة ساحلية قد تتأثر، عند ظروف جوية معينة، بالانبعاثات المرتبطة بمنطقة مليته، بإحداثيات 32.933 شمالا و12.083 شرقا. تم تثبيت أجهزة أخذ العينات على ارتفاع يتراوح بين 3 و5 أمتار فوق سطح الأرض، بما يسمح بتمثيل الهواء المحيط في منطقة التعرض ويقلل من تأثير إعادة تعليق الغبار القريب جدا من السطح.

### خطة أخذ عينات$PM_{2.5}$

غطت الدراسة ستة أشهر مختارة، هي سبتمبر وأكتوبر ونوفمبر 2025، ومارس وأبريل ومايو 2026. تم جمع 72 عينة أساسية من الجسيمات الدقيقة العالقة$PM_{2.5}$ ، بواقع أربع مدن وستة أشهر وثلاث عينات لكل مدينة في كل شهر. جُمعت العينات باستخدام جهاز أخذ عينات منخفض الحجم مخصص للجسيمات الدقيقة، ومزوّد بفاصل حجمي $PM_{2.5}$ من نوعimpactor/cyclone ، مع استخدام فلاتر PTFE بقطر 47 mm. استمرت مدة السحب لكل عينة حوالي 24 ساعة، وبمعدل تدفق يقارب 16.7 L/min ، بما يتوافق مع مبادئ الطريقة المرجعية لوكالة حماية البيئة الأمريكية لتحديد $PM_{2.5}$ في الهواء الجوي ( U.S. EPA, 40 CFR Part 50, Appendix L)، وتم تسجيل رقم العينة، ورقم الفلتر، والمدينة، ونوع الموقع، وتاريخ ووقت بداية ونهاية السحب، ومدة التشغيل، ومعدل التدفق، وحجم الهواء المسحوب، والملاحظات الميدانية المرتبطة بكل عينة.

**التقدير الوزني لتركيزPM2.5**

تم تحديد كتلة PM2.5 بطريقة القياس الوزني من خلال وزن فلاتر PTFE قبل وبعد أخذ العينة. تم حساب كتلة الجسيمات من الفرق بين وزن الفلتر بعد السحب ووزنه قبل السحب، ثم تم حساب تركيز PM2.5 بقسمة كتلة الجسيمات المجموعة على حجم الهواء المسحوب. استخدمت المعادلة الآتية لحساب التركيز:

$$PM_{2.5}(\mu g/m^3) = \frac{(W_{post} - W_{pre}) \times 1000}{V}$$

حيث يمثل $W_{post}$وزن الفلتر بعد أخذ العينة بوحدةmg ، ويمثل $W_{pre}$وزن الفلتر قبل أخذ العينة بوحدة mg، بينما يمثل $V$حجم الهواء المسحوب بوحدة .$m^3$ وتم ضرب فرق الوزن في 1000 لتحويل الكتلة من mgإلى $\mu g$ .بعد ذلك تم تصنيف تراكيز PM2.5 وصفيا وفقا للفئات المسجلة في قاعدة البيانات، وذلك لتسهيل المقارنة بين المدن والأشهر.

**التحليل الكيميائي للأيونات غير العضوية**

تم تخصيص جزء من عينات الفلاتر لتحليل الأيونات غير العضوية الذائبة في الماء، مع التركيز على الكبريتات $(SO_4^{2-})$والنترات $(NO_3^-)$، نظرا لأهميتهما كمكونات ثانوية رئيسية في الجسيمات الدقيقة. تم إجراء الاستخلاص المائي من الفلاتر، ثم تحليل المستخلصات باستخدام كروماتوغرافيا الأيونات Ion Chromatographyأو طريقة تحليلية معتمدة مكافئة عند عدم توفر الجهاز. تم التعبير عن تراكيز الكبريتات والنترات بوحدة $\mu g/m^3$، كما تم حساب مساهمة كل منهما كنسبة مئوية من الكتلة الكلية لـ PM2.5لكل عينة، بما يسمح بتقييم الدور النسبي للمكونات غير العضوية الثانوية في تركيب الجسيمات الدقيقة.

تم حساب النسبة المئوية لكل أيون من كتلة PM2.5 وفق المعادلة الآتية:

$$Ion\ Contribution\ (\%) = \frac{C_{ion}}{PM_{2.5}} \times 100$$

حيث يمثل $C_{ion}$تركيز الكبريتات أو النترات بوحدة $\mu g/m^3$، ويمثل $PM_{2.5}$تركيز الجسيمات الدقيقة في العينة نفسها.

**تحليل المعادن الثقيلة**

تم تحليل المعادن الثقيلة المختارة فيPM2.5 ، وهي الكادميوم Cd والرصاص Pb والنيكلNi ، نظرا لأهميتها كمؤشرات كيميائية على المصادر الصناعية والمرورية والاحتراقية، إضافة إلى دلالتها السمية المحتملة. تم إجراء الهضم الحمضي لأجزاء ممثلة من الفلاتر، ثم قياس تركيز المعادن باستخدام-ICP OESأو AAS كطرق تحليلية مناسبة، مع اعتبار ICP-MS خيارا أكثر حساسية عند توفره. تم التعبير عن تراكيز المعادن بوحدةng/m³ ، وتم إدراج النتائج لكل عينة بما يسمح بالمقارنة بين المدن والأشهر وتحديد المواقع ذات الإسهام الأعلى من المعادن النزرة.

وعند الحاجة إلى استخدام نتائج المعادن في تقييم المخاطر الصحية، تم تحويل الوحدات من ng/m³ إلى $\mu g/m^3$أو mg/m³ وفقا لوحدة معامل السمية المستخدم، وذلك لتجنب أي خطأ في حساب مؤشرات الخطر.

**بيانات الأرصاد الجوية**

تم استخدام بيانات الأرصاد الجوية الموافقة لفترات أخذ العينات بهدف تفسير التغيرات المكانية والزمانية في تراكيز PM2.5 ومكوناتها الكيميائية. شملت المتغيرات المسجلة درجة الحرارة، والرطوبة النسبية، وسرعة الرياح، واتجاه الرياح، والضغط الجوي، وكمية الأمطار خلال 24 ساعة، إضافة إلى مؤشرات نوعية لوجود الغبار، ورياح القبلي، واحتمال تأثر موقع زوارة بانبعاثات من اتجاه مليته. تم استخدام هذه

البيانات كعامل تفسيري داعم عند مناقشة تغير التراكيز الكيميائية بين المواقع والفترات، خاصة في الحالات التي قد تتأثر فيها مستويات PM2.5 باتجاه الرياح أو الغبار أو الظروف الساحلية.

**البيانات الصحية المجمعة**

تم استخدام بيانات صحية أسبوعية مجمعة وغير شخصية لكل مدينة، شملت زيارات الربو، ومراجعات الطوارئ التنفسية، وزيارات أمراض القلب، إضافة إلى معدلات الربو وأمراض القلب لكل 100,000 نسمة. كما تضمنت البيانات توزيعا وصفيا حسب الفئات العمرية والجنس. ولأغراض التحليل البيئي، تم ربط البيانات الصحية بمتوسطات PM2.5 الشهرية لكل مدينة. وتم التعامل مع هذه البيانات باعتبارها مؤشرات صحية مجمعة على مستوى المدينة والزمن، وليست بيانات فردية، لذلك تم تفسير العلاقات الناتجة بوصفها ارتباطات بيئية إحصائية لا دليلا مباشرا على السببية الفردية.

**ضبط الجودة والتحقق من موثوقية القياسات**

تم تطبيق إجراءات ضبط الجودة والتحقق النوعي لضمان موثوقية القياسات الوزنية والكيميائية. تضمنت قاعدة البيانات فلاتر فارغة حقلية لكل شهر من أشهر الدراسة، وفلاتر فارغة للنقل، وفلاتر فارغة مختبرية، إضافة إلى عينات مكررة للتحقق من دقة القياس الوزني. بلغ عدد سجلات ضبط الجودة 20 سجلا، شملت 6 فلاتر حقلية فارغة، و2 فلاتر نقل فارغة، و4 فلاتر مختبرية فارغة، و8 عينات مكررة.

تم استخدام الفلاتر الفارغة لتقييم احتمال التلوث أثناء النقل أو التحضير أو المعالجة المختبرية، بينما استخدمت العينات المكررة لتقييم قابلية تكرار القياسات. وأظهرت سجلات ضبط الجودة أن القراءات كانت ضمن حدود القبول، مما يدعم موثوقية البيانات واستخدامها في التحليل الكيميائي والإحصائي.

**تقييم المخاطر الصحية للمعادن الثقيلة**

تم اعتماد إطار أولي لتقييم المخاطر الصحية المحتملة للمعادن الثقيلة المرتبطة بالجسيمات الدقيقة$PM_{2.5}$ ، وذلك بالاستناد إلى تراكيز الكادميوم Cd والرصاص Pb والنيكل Ni المقاسة في العينات. تم تقييم الخطر غير السرطاني باستخدام معامل الخطر(Hazard Quotient (HQ ، الذي يمثل نسبة تركيز التعرض للمعدن إلى قيمة السمية المرجعية للاستنشاق، في حين تم تقدير الخطر غير السرطاني الكلي من خلال مؤشر الخطر(Hazard Index (HI ، المحسوب كمجموع معاملات الخطر للمعادن المدروسة. كما تم تقدير الخطر السرطاني المحتمل للمعادن ذات الدلالة السرطانية، عند توفر معامل خطر الاستنشاق Inhalation Unit Risk (IUR)، من خلال ضرب تركيز التعرض Exposure Concentration (EC)في قيمة IUR الخاصة بالمعدن. وقد استُخدمت هذه المؤشرات باعتبارها أدوات فحص أولية للمخاطر الصحية المحتملة المرتبطة بالتعرض الاستنشاقي للمعادن الثقيلة، مع مراعاة أن دقة التقدير تعتمد على ملاءمة معاملات السمية المستخدمة، ووحدة التركيز، وافتراضات التعرض المعتمدة في الحسابات (U.S. EPA, 2009).

**التحليل الإحصائي**

تم إجراء التحليل الإحصائي بهدف وصف التراكيز الكيميائية، ومقارنة التباين بين المدن والأشهر، ودراسة الارتباطات البيئية مع المؤشرات الصحية. تم حساب المتوسطات، والقيم الدنيا والعظمى، والانحرافات المعيارية لتراكيز PM2.5 والكبريتات والنترات والمعادن الثقيلة حسب المدينة والشهر. كما تم استخدام المقارنات المكانية والزمانية لتحديد الفروق بين المواقع الحضرية والصناعية والساحلية.

ولفحص العلاقة بين PM2.5 والمؤشرات الصحية المجمعة، تم استخدام معاملات الارتباط بين متوسطات PM2.5الشهرية ومعدلات الربو وأمراض القلب لكل 100,000 نسمة. وتم تفسير النتائج في إطار دراسة بيئية رصدية، مع تجنب الاستنتاجات السببية المباشرة، نظرا لاعتماد البيانات الصحية على مجاميع مكانية وزمانية وليس على قياسات فردية.

**النتائج**

**1. اكتمال البيانات وضبط الجودة**

تم تحليل 72 عينة أساسية من الجسيمات الدقيقة العالقةPM2.5 ، موزعة بالتساوي على أربع مدن في غرب ليبيا، وهي طرابلس، الزاوية، صبراته، وزوارة، بواقع 18 عينة لكل مدينة. غطت العينات ستة

أشهر مختارة، شملت سبتمبر، أكتوبر، ونوفمبر 2025، ومارس، أبريل، ومايو 2026. وكما يوضح جدول 1، تضمنت قاعدة البيانات 20 سجل ضبط جودة، شملت فلاتر فارغة حقلية، وفلاتر نقل، وفلاتر فارغة مختبرية، وعينات مكررة. وقد صنفت جميع سجلات ضبط الجودة ضمن حدود القبول.

**جدول 1.** ملخص عينات الدراسة وسجلات ضبط الجودة

| البند | القيمة |
|---|---|
| عدد المدن | 4 |
| مدن الدراسة | طرابلس، الزاوية، صبراته، زوارة |
| فترة الدراسة | سبتمبر–نوفمبر 2025، مارس–مايو 2026 |
| عدد عينات PM2.5 الأساسية | 72 |
| عدد العينات لكل مدينة | 18 |
| عدد العينات لكل مدينة/شهر | 3 |
| عدد سجلات ضبط الجودةQA/QC | 20 |
| الفلاتر الفارغة الحقلية | 6 |
| فلاتر النقل | 2 |
| الفلاتر الفارغة المختبرية | 4 |
| العينات المكررة | 8 |
| حالة القبول | جميع السجلات مقبولة |

أظهرت بيانات ضبط الجودة أن متوسط تغير كتلة الفلاتر الفارغة بلغ 7.83µg ، بمدى تراوح بين -3.90 و17.80 .µg كما تراوحت قيم الفروق النسبية المئوية للعينات المكررة PM2.5 بين 0.0% و4.7%، وبمتوسط 2.33%. وتشير هذه القيم إلى قابلية جيدة لتكرار القياسات الوزنية، وانخفاض واضح في احتمال التلوث العرضي أثناء النقل أو التحضير المختبري.

**2. مستويات PM2.5 في مدن الدراسة**

بلغ المتوسط العام لتركيز PM2.5 في جميع العينات 40.57 ± 13.22 µg/m³ ، بمدى تراوح بين 21.20 و75.74 .µg/m³ وكما يبين جدول 2، ظهرت فروق مكانية واضحة بين المدن الأربع، حيث سجلت الزاوية أعلى متوسط لتركيز PM2.5 بقيمة 56.99 ± 10.40 µg/m³ ، تلتها زوارة بمتوسط 37.79 ± 8.37 µg/m³ ، ثم طرابلس بمتوسط 37.21 ± 9.77 µg/m³ ، بينما سجلت صبراته أقل متوسط بقيمة 30.30 ± 6.23 µg/m³ .

**جدول 2.** الإحصاء الوصفي لتراكيز PM2.5 حسب المدينة.

| المدينة | عدد العينات | المتوسط ± الانحراف المعياري µg/m³ | الوسيط µg/m³ | الأدنى µg/m³ | الأعلى µg/m³ |
|---|---|---|---|---|---|
| طرابلس | 18 | 37.21 ± 9.77 | 32.59 | 26.24 | 61.49 |
| الزاوية | 18 | 56.99 ± 10.40 | 54.68 | 43.73 | 75.74 |
| صبراته | 18 | 30.30 ± 6.23 | 29.53 | 21.20 | 43.02 |
| زوارة | 18 | 37.79 ± 8.37 | 36.23 | 26.43 | 55.12 |
| إجمالي العينات | 72 | 40.57 ± 13.22 | 36.63 | 21.20 | 75.74 |

تشير المقارنة بين المدن إلى أن متوسط PM2.5 في الزاوية كان أعلى بنحو 1.53 مرة من طرابلس، و1.51 مرة من زوارة، و1.88 مرة من صبراته. ويعكس ذلك وجود تباين مكاني واضح في الحمل الجسيمي الدقيق، يتوافق مع اختلاف طبيعة المواقع بين حضرية وصناعية وساحلية.

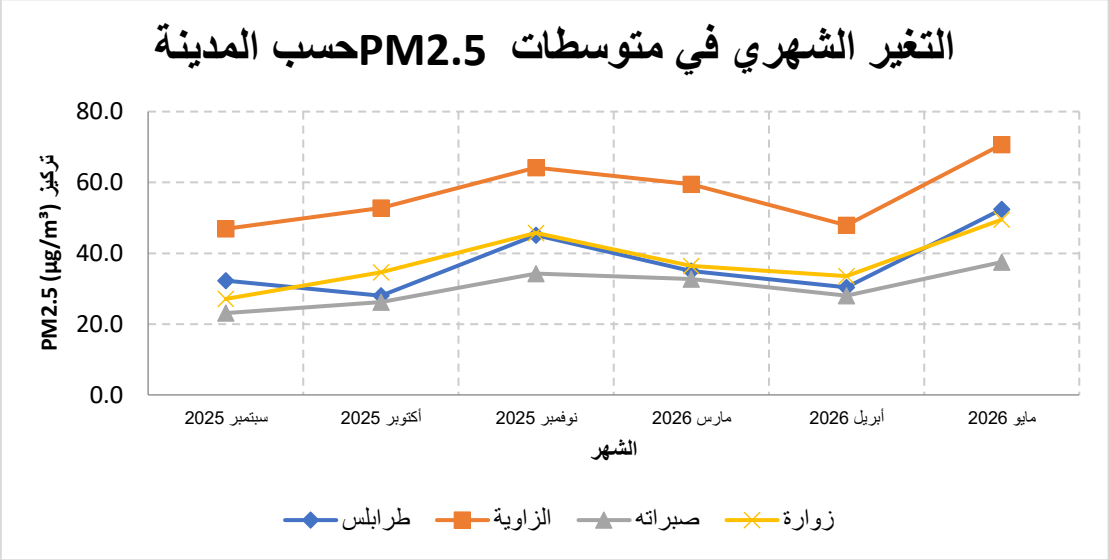
### 3. التباين الزمني لتراكيزPM2.5

أظهرت النتائج تباينا زمنيا واضحا في تراكيز PM2.5 خلال أشهر الدراسة. وكما يوضح جدول 3، كان أعلى متوسط شهري عام في مايو 2026 بقيمة 52.53 µg/m³ ، يليه نوفمبر 2025 بمتوسط 47.33 µg/m³، ثم مارس 2026 بمتوسط 40.90 µg/m³. في المقابل، سجل سبتمبر 2025 أقل متوسط شهري عام بقيمة 32.35 µg/m³ .

**جدول 3.** المتوسطات الشهرية لتراكيز PM2.5 حسب المدينة.

| الشهر | طرابلس µg/m³ | الزاوية µg/m³ | صبراته µg/m³ | زوارة µg/m³ | المتوسط الشهري العام µg/m³ |
|---|---|---|---|---|---|
| سبتمبر 2025 | 32.3 | 46.9 | 23.1 | 27.1 | 32.35 |
| أكتوبر 2025 | 28.0 | 52.8 | 26.2 | 34.6 | 35.40 |
| نوفمبر 2025 | 45.1 | 64.2 | 34.3 | 45.7 | 47.33 |
| مارس 2026 | 35.0 | 59.5 | 32.7 | 36.4 | 40.90 |
| أبريل 2026 | 30.4 | 47.9 | 28.0 | 33.5 | 34.95 |
| مايو 2026 | 52.4 | 70.7 | 37.5 | 49.5 | 52.53 |

ويعرض الشكل 1 التغير الشهري في متوسطات PM2.5 حسب المدينة. ويتضح من الشكل أن الزاوية حافظت على أعلى المتوسطات في جميع أشهر الدراسة، مع بلوغ أعلى قيمة شهرية في مايو 2026 بمتوسط 70.7 µg/m³. كما أظهرت طرابلس وزوارة ارتفاعا واضحا في مايو 2026، إذ بلغ متوسط PM2.5فيهما 52.4 و49.5 µg/m³ على التوالي، بينما بقيت صبراته الأقل نسبيا خلال معظم أشهر الرصد.




**شكل 1.** التغير الشهري في متوسطات PM2.5 في طرابلس، الزاوية، صبراته، وزوارة خلال فترة الدراسة.

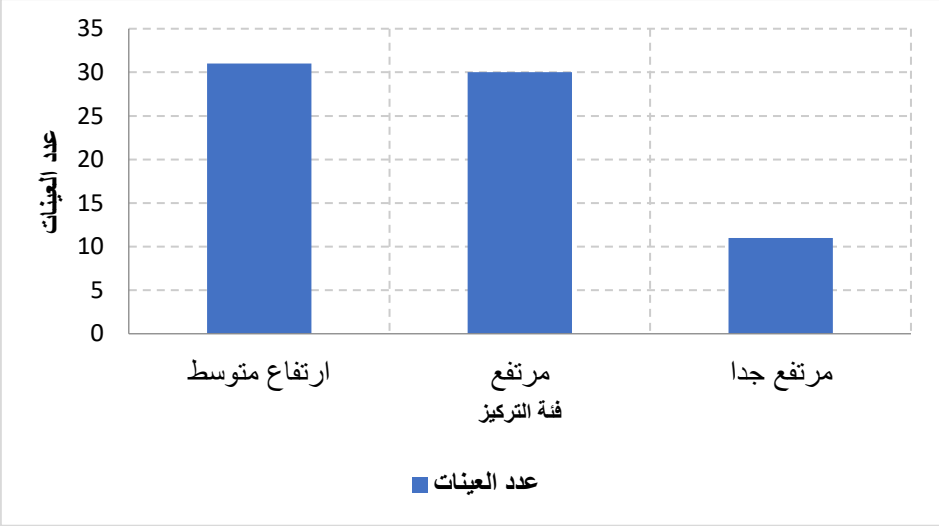
### 4. تصنيف مستويات PM2.5

تم تصنيف عينات PM2.5 إلى ثلاث فئات وصفية مسجلة في قاعدة البيانات، وهي: ارتفاع متوسط، مرتفع، ومرتفع جدا. وكما يبين جدول 4، صنفت 31 عينة ضمن فئة الارتفاع المتوسط، و30 عينة ضمن فئة الارتفاع المرتفع، و11 عينة ضمن فئة الارتفاع المرتفع جدا. وبذلك شكلت العينات المرتفعة والمرتفعة جدا مجتمعة 56.9% من إجمالي العينات.

**جدول 4.** توزيع عينات PM2.5 حسب فئات التركيز

| فئة PM2.5 | عدد العينات | النسبة من إجمالي العينات% |
|---|---|---|
| ارتفاع متوسط Moderate elevation | 31 | 43.1 |
| مرتفع High | 30 | 41.7 |
| مرتفع جدا Very high | 11 | 15.3 |
| الإجمالي | 72 | 100 |

ويوضح الشكل 2 التوزيع النسبي والعددي لفئات PM2.5 في العينات المدروسة. ويبين الشكل أن فئتي الارتفاع المتوسط والارتفاع المرتفع شكلتا النسبة الأكبر من العينات، بينما مثلت فئة الارتفاع المرتفع جدا نسبة أقل، لكنها كانت ذات أهمية بيئية واضحة بسبب تمركزها غالبا في الموقع الصناعي/المروري بمدينة الزاوية.




**شكل 2.** التوزيع العددي والنسبي لعينات PM2.5 حسب فئات التركيز.

كما أظهرت البيانات أن جميع العينات تجاوزت 15 µg/m³ ، وأن 41 عينة من أصل 72 تجاوزت 35 µg/m³، في حين تجاوزت 16 عينة قيمة 50 µg/m³. وتشير هذه النتائج إلى أن ارتفاع PM2.5 لم يكن مقتصرا على حالات فردية معزولة، بل كان نمطا متكررا خلال فترة الدراسة.

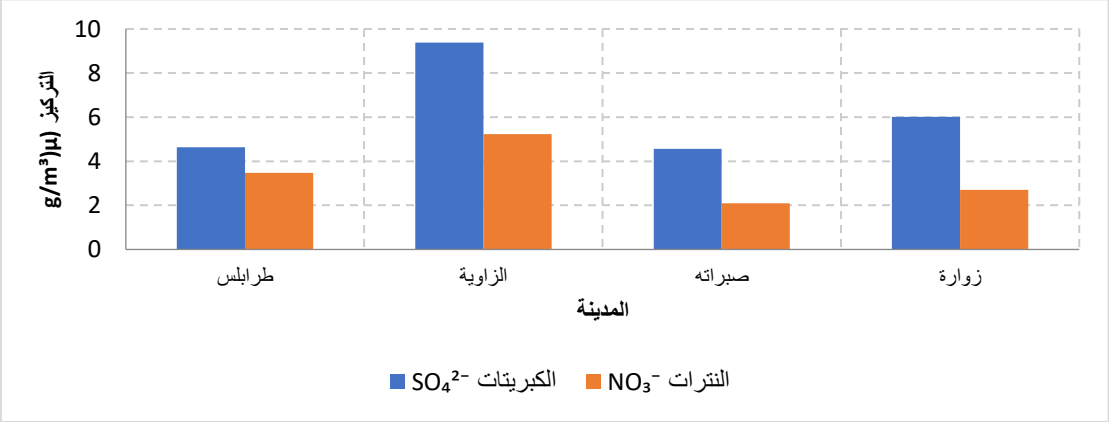
### 5. تراكيز الكبريتات والنترات في PM2.5

أظهر التحليل الكيميائي للأيونات غير العضوية أن الكبريتات $SO_4^{2-}$ والنترات $NO_3^-$ شكلتا مكونين مهمين من الكتلة الكلية للجسيمات الدقيقة. وكما يوضح جدول 5، بلغ المتوسط العام للكبريتات في جميع العينات 6.15 µg/m³ ، بينما بلغ المتوسط العام للنترات 3.37 µg/m³. وعلى مستوى المدن، سجلت الزاوية أعلى متوسط للكبريتات بقيمة 9.38 ± 1.95 µg/m³ ، وأعلى متوسط للنترات بقيمة 5.23 ± 1.22 µg/m³. في المقابل، سجلت صبراته أقل متوسط للنترات بقيمة 2.10 ± 0.65 µg/m³.

**جدول 5.** تراكيز الكبريتات والنترات ومساهمتهما النسبية في PM2.5 حسب المدينة.

| المدينة | $SO_4^{2-}$المتوسط ± SD µg/m³ | $NO_3^-$المتوسط ± SD µg/m³ | $SO_4^{2-}$ % من PM2.5 | $NO_3^-$ % من PM2.5 | $SO_4^{2-}$ + $NO_3^-$ % |
|---|---|---|---|---|---|
| طرابلس | 4.64 ± 1.39 | 3.47 ± 1.01 | 12.42 | 9.39 | 21.82 |
| الزاوية | 9.38 ± 1.95 | 5.23 ± 1.22 | 16.45 | 9.23 | 25.68 |
| صبراته | 4.56 ± 1.14 | 2.10 ± 0.65 | 15.06 | 6.89 | 21.95 |
| زوارة | 6.02 ± 1.79 | 2.70 ± 0.80 | 15.86 | 7.13 | 22.99 |

ويبين الشكل 3 المقارنة بين متوسطات الكبريتات والنترات في المدن الأربع. ويوضح الشكل أن الزاوية سجلت أعلى القيم لكلا الأيونين، بما يتوافق مع كونها أعلى المدن في تركيز PM2.5 الكلي. كما يلاحظ أن مساهمة الكبريتات كانت أعلى من مساهمة النترات في جميع المدن، وهو ما يشير إلى أهمية الكبريتات كمكون غير عضوي ثانوي ضمن PM2.5 في منطقة الدراسة.




**شكل 3.** متوسط تراكيز الكبريتات $SO_4^{2-}$ والنترات $NO_3^-$ في PM2.5 حسب مدن الدراسة.

وعند حساب المساهمة المشتركة للكبريتات والنترات في كتلةPM2.5 ، تراوحت النسبة بين 21.82% في طرابلس و25.68% في الزاوية. ويظهر ذلك أن المكونات غير العضوية الثانوية تمثل جزءا معتبرا من كتلةPM2.5 ، خاصة في الموقع الصناعي/المروري بالزاوية.

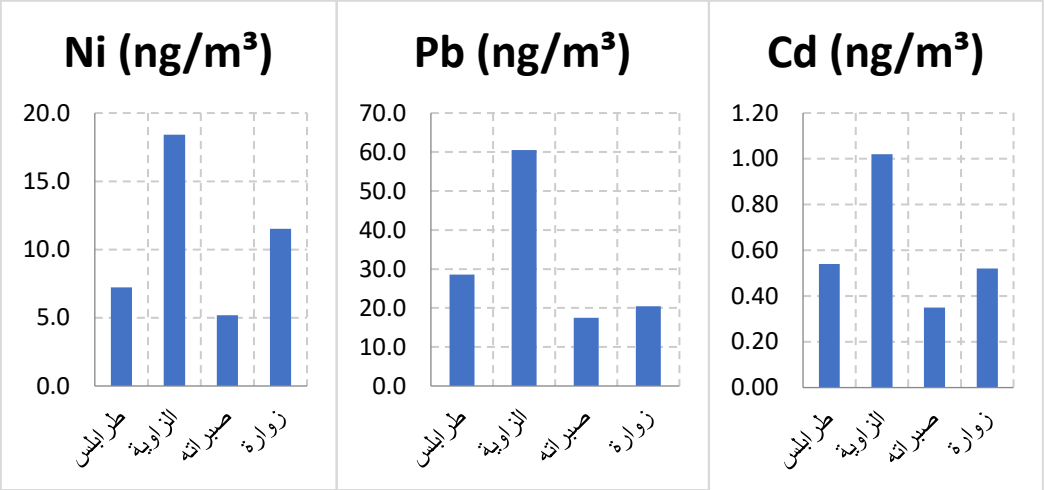
**6. تراكيز المعادن الثقيلة فيPM2.5**

أظهرت نتائج تحليل المعادن الثقيلة وجود تباين واضح في تراكيز Cd و Pb وNi بين مدن الدراسة. وكما يبين جدول 6، سجلت الزاوية أعلى متوسطات للمعادن الثلاثة، إذ بلغ متوسط Cd قيمة 1.02 ± 0.17 ng/m³، ومتوسط Pb قيمة 60.51 ± 15.29 ng/m³ ، ومتوسط Ni قيمة 18.42 ± 3.51 ng/m³. أما صبراته فسجلت أقل متوسطات عامة للمعادن، حيث بلغ متوسط Cd قيمة 0.35 ± 0.06 ng/m³ ، ومتوسط Pb قيمة 17.49 ± 2.76 ng/m³ ، ومتوسط Ni قيمة 5.19 ± 0.86 ng/m³.

**جدول 6.** تراكيز المعادن الثقيلة Cd و Pb وNi في PM2.5 حسب المدينة

| المدينة | Cdالمتوسط ± SD ng/m³ | Pbالمتوسط ± SD ng/m³ | Niالمتوسط ± SD ng/m³ |
|---|---|---|---|
| طرابلس | 0.54 ± 0.09 | 28.58 ± 4.24 | 7.22 ± 1.26 |
| الزاوية | 1.02 ± 0.17 | 60.51 ± 15.29 | 18.42 ± 3.51 |
| صبراته | 0.35 ± 0.06 | 17.49 ± 2.76 | 5.19 ± 0.86 |
| زوارة | 0.52 ± 0.07 | 20.48 ± 3.61 | 11.52 ± 2.81 |
| المتوسط العام | 0.60 ± 0.27 | 31.77 ± 19.00 | 10.59 ± 5.61 |

ويوضح الشكل 4 التوزيع المقارن للمعادن الثقيلة في المدن الأربع. ويظهر من الشكل أن الزاوية امتلكت بصمة معدنية أعلى بوضوح، خصوصا بالنسبة إلى الرصاص والنيكل، بينما سجلت صبراته أدنى القيم. ويعكس هذا النمط اختلافا واضحا في التركيب الكيميائي للجسيمات الدقيقة بين الموقع الصناعي/المروري وبقية المواقع الساحلية أو الحضرية.




**شكل 4.** متوسط تراكيز المعادن الثقيلة Cd و Pb و Ni في PM2.5 حسب مدن الدراسة.

ومن الناحية النسبية، كان متوسط Pb في الزاوية أعلى بنحو 2.12 مرة من طرابلس، و3.46 مرة من صبراته، و2.95 مرة من زوارة. كما كان متوسط Ni في الزاوية أعلى بنحو 2.55 مرة من طرابلس، و3.55 مرة من صبراته، و1.60 مرة من زوارة. وتشير هذه الفروق إلى أن المعادن الثقيلة تمثل مؤشرا كيميائيا مهما للتمييز بين مصادر PM2.5 في مواقع الدراسة.

### 7. العلاقة بين PM2.5 ومكوناته الكيميائية

تم فحص العلاقة بين تركيز PM2.5 والتراكيز الكيميائية المقاسة في العينات الفردية باستخدام معامل ارتباط بيرسون. وكما يوضح جدول 7، أظهرت جميع المكونات الكيميائية المدروسة ارتباطات موجبة مع PM2.5. وكان أقوى ارتباط مع الكبريتات $SO_4^{2-}$ ، حيث بلغ معامل الارتباط $r = 0.922$ ، يليه الارتباط مع النترات $NO_3^-$ بقيمة $r = 0.840$. كما سجلت المعادن الثقيلة ارتباطات موجبة متفاوتة القوة مع PM2.5، بلغت $r = 0.802$ للكادميوم، و $r = 0.746$ للرصاص، و $r = 0.655$ للنيكل. وكانت جميع هذه الارتباطات ذات دلالة إحصائية عند $p < 0.001$.

**جدول 7.** معاملات الارتباط بين PM2.5 والمكونات الكيميائية في العينات الفردية

| المتغير الكيميائي | معامل الارتباط مع PM2.5، r | قيمة p | عدد العينات |
|---|---|---|---|
| $SO_4^{2-}$ | 0.922 | < 0.001 | 72 |
| $NO_3^-$ | 0.840 | < 0.001 | 72 |
| Cd | 0.802 | < 0.001 | 72 |
| Pb | 0.746 | < 0.001 | 72 |
| Ni | 0.655 | < 0.001 | 72 |

### 8. تأثير العوامل الجوية المصاحبة

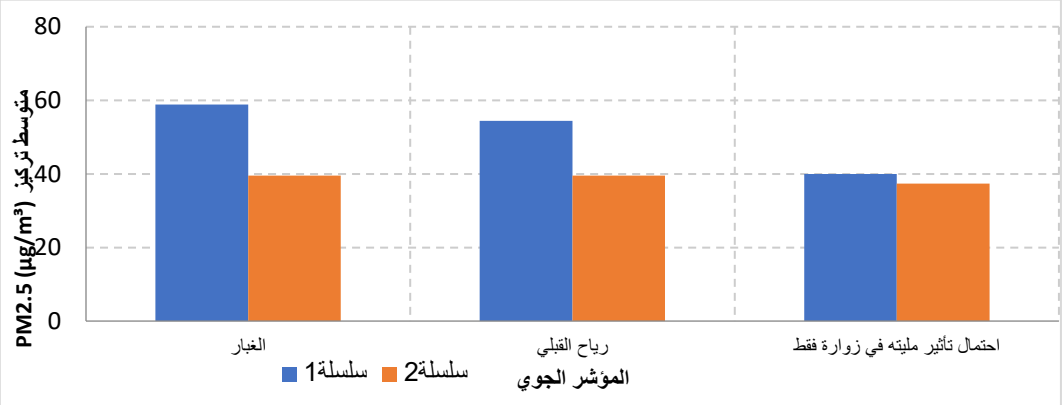
تم تحليل بيانات الأرصاد الجوية المصاحبة لفترات أخذ العينات بهدف فحص العلاقة بين بعض الظروف الجوية وارتفاع تراكيز PM2.5. وكما يوضح جدول 8، سجلت العينات المصنفة بوجود غبار متوسط PM2.5 قدره 58.84 ± 13.62 µg/m³ ، مقارنة بـ 39.50 ± 12.48 µg/m³ في العينات غير المصنفة

كغبار. كما سجلت العينات المصاحبة لرياح القبلي متوسطا أعلى بلغ 54.39 ± 16.11 µg/m³ ، مقارنة بـ 39.54 ± 12.52 µg/m³ في العينات غير المصاحبة للقبلي.

**جدول 8.** متوسطات PM2.5 حسب بعض المؤشرات الجوية النوعية.

| المؤشر الجوي | الحالة | عدد العينات | متوسط PM2.5 µg/m³ | الانحراف المعياري |
|---|---|---|---|---|
| الغبار | نعم | 4 | 58.84 | 13.62 |
| الغبار | لا | 68 | 39.50 | 12.48 |
| رياح القبلي | نعم | 5 | 54.39 | 16.11 |
| رياح القبلي | لا | 67 | 39.54 | 12.52 |
| احتمال تأثير مليته في زوارة فقط | نعم | 3 | 39.96 | 11.13 |
| احتمال تأثير مليته في زوارة فقط | لا | 15 | 37.36 | 8.14 |

ويوضح الشكل 5 الفروق في متوسطات PM2.5 بين حالات وجود الغبار وعدم وجوده، وكذلك بين حالات رياح القبلي وعدم وجودها. ويبين الشكل أن المتوسطات كانت أعلى في كل من حالات الغبار والقبلي، وهو ما يشير إلى أن الظروف الجوية النوعية قد تسهم في تفسير بعض الارتفاعات الملحوظة في تراكيز PM2.5خلال فترة الرصد.




**شكل 5.** مقارنة متوسطات PM2.5 بين حالات وجود الغبار وعدم وجوده، وبين حالات رياح القبلي وعدم وجودها.

أما بالنسبة إلى مؤشر احتمال تأثر زوارة بانبعاثات من اتجاه مليته، فقد بلغ متوسط PM2.5 في الحالات المصنفة باحتمال التأثر 39.96 µg/m³ ، مقارنة بـ 37.36 µg/m³ في الحالات غير المصنفة بذلك. وعلى الرغم من وجود ارتفاع محدود في المتوسط، فإن عدد الحالات المصنفة باحتمال التأثر كان صغيرا، ولذلك تم تفسير هذه النتيجة بحذر.

وعند فحص المتغيرات الجوية المستمرة، كانت الارتباطات بين PM2.5 وكل من درجة الحرارة، والرطوبة النسبية، وسرعة الرياح، وكمية المطر ضعيفة وغير دالة إحصائيا، إذ بلغت معاملات الارتباط -0.094، و-0.102، و0.069، و0.040 على التوالي. ويشير ذلك إلى أن المؤشرات النوعية مثل الغبار والقبلي كانت أكثر وضوحا في تفسير بعض الارتفاعات مقارنة بالمتغيرات الجوية المستمرة ضمن مجموعة البيانات الحالية.

### 9. المؤشرات الصحية المجمعة وعلاقتها بمتوسطاتPM2.5

تم ربط متوسطات PM2.5 الشهرية حسب المدينة بالمؤشرات الصحية المجمعة في المدينة نفسها، وخاصة معدلات زيارات الربو ومعدلات زيارات أمراض القلب لكل 100,000 نسمة. وكما يوضح جدول 9، سجلت الزاوية أعلى متوسط لمعدل الربو الشهري بواقع 103.47 حالة لكل 100,000 نسمة، وأعلى متوسط لمعدل أمراض القلب بواقع 60.13 حالة لكل 100,000 نسمة، بالتزامن مع تسجيلها أعلى متوسط لتركيز PM2.5 بين المدن. في المقابل، سجلت صبراته أدنى متوسط PM2.5 وأدنى متوسط لمعدل الربو الشهري بين المدن.

**جدول 9.** متوسطات PM2.5 والمؤشرات الصحية الشهرية حسب المدينة

| المدينة | متوسط PM2.5 µg/m³ | متوسط معدل الربو الشهري لكل 100,000 | متوسط معدل أمراض القلب الشهري لكل 100,000 |
|---|---|---|---|
| طرابلس | 37.20 | 81.70 | 46.63 |
| الزاوية | 57.00 | 103.47 | 60.13 |
| صبراته | 30.30 | 69.38 | 39.55 |
| زوارة | 37.80 | 78.88 | 45.27 |

ولفحص قوة العلاقة إحصائيا، تم حساب معاملات الارتباط بين متوسط PM2.5 الشهري والمؤشرات الصحية المجمعة على مستوى المدينة/الشهر. وكما يبين جدول 10، ظهر ارتباط موجب قوي بين PM2.5 ومعدل الربو الشهري لكل 100,000 نسمة، حيث بلغ $r = 0.947$ عند $p < 0.001$. كما ظهر ارتباط موجب قوي بين PM2.5 ومعدل أمراض القلب الشهري لكل 100,000 نسمة، حيث بلغ $r = 0.933$ عند $p < 0.001$.

**جدول 10.** معاملات الارتباط بين PM2.5 والمؤشرات الصحية المجمعة.

| المؤشر الصحي | وحدة التحليل | معامل الارتباط مع PM2.5، r | قيمةp | عدد المشاهدات |
|---|---|---|---|---|
| معدل الربو الشهري | لكل 100,000 نسمة | 0.947 | < 0.001 | 24 |
| معدل أمراض القلب الشهري | لكل 100,000 نسمة | 0.933 | < 0.001 | 24 |
| عدد زيارات الربو الشهري | عدد مطلق | 0.052 | 0.808 | 24 |
| عدد زيارات الطوارئ التنفسية | عدد مطلق | 0.055 | 0.799 | 24 |
| عدد زيارات أمراض القلب | عدد مطلق | 0.051 | 0.815 | 24 |

وتجدر الإشارة إلى أن الارتباطات القوية ظهرت عند استخدام المعدلات السكانية لكل 100,000 نسمة، بينما كانت الارتباطات ضعيفة وغير دالة عند استخدام الأعداد المطلقة للزيارات. ويعكس ذلك أهمية الاعتماد على المعدلات السكانية في المقارنات بين المدن، نظرا لاختلاف حجم السكان بين طرابلس والزاوية وصبراته وزوارة. كما تم تفسير هذه العلاقات بوصفها ارتباطات بيئية مجمعة، وليست دليلا مباشرا على السببية الفردية.

**مناقشة النتائج**

أظهرت نتائج الدراسة وجود تباين مكاني واضح في تراكيز PM2.5 بين مدن غرب ليبيا المدروسة، حيث سجلت الزاوية أعلى متوسط لتركيز الجسيمات الدقيقة، تلتها زوارة وطرابلس، بينما سجلت صبراته أدنى المتوسطات. ويدعم هذا النمط الفرضية الأولى للدراسة، التي افترضت وجود فروق في تراكيز PM2.5 بين المدن تبعا لاختلاف طبيعة الموقع ومصادر الانبعاث. ويبدو أن ارتفاع PM2.5 في الزاوية يرتبط بطبيعتها كموقع صناعي/مروري، حيث تتداخل الانبعاثات الصناعية واحتراق الوقود وحركة المرور وإعادة تعليق الغبار في زيادة الحمل الجسيمي. ويتفق هذا التفسير مع ما توصل إليه Busheina et al. (2017)في الزاوية، حيث كانت تراكيز الجسيمات والعناصر النزرة أعلى قرب المواقع المتأثرة بالمرور والنشاط الصناعي. كما يتوافق مع دراسة Shetaya et al. (2024) في القاهرة الكبرى، التي أظهرت أن المواقع الصناعية تسجل مستويات أعلى من PM2.5 والمعادن المرتبطة بها مقارنة بالمواقع الحضرية.

من الناحية الزمنية، أظهرت النتائج ارتفاعا واضحا في متوسطات PM2.5 خلال نوفمبر 2025 ومايو 2026، مع تسجيل أعلى متوسط شهري عام في مايو. ويشير ذلك إلى أن التلوث الجسيمي في منطقة الدراسة لا يتأثر بالموقع فقط، بل يتغير أيضا مع الفترات الزمنية والظروف الجوية المصاحبة. وقد أظهرت النتائج أن حالات الغبار ورياح القبلي ارتبطت بمتوسطات أعلى منPM2.5 ، مما يرجح مساهمة إعادة تعليق الجسيمات والنقل الهوائي في رفع التراكيز خلال بعض الفترات. ويتفق ارتفاع نوفمبر جزئيا مع دراسة(2024) .Fares et al ، التي سجلت أعلى مستويات AQI و PM2.5وPM10 في نوفمبر في طرابلس وزليتن. ومع ذلك، فإن ضعف الارتباطات بين PM2.5 والمتغيرات الجوية المستمرة مثل الحرارة والرطوبة وسرعة الرياح والمطر يشير إلى أن تأثير الأرصاد في هذه الدراسة كان أوضح من خلال الأحداث النوعية مثل الغبار والقبلي، وليس من خلال علاقات خطية بسيطة.

أبرزت النتائج أهمية التركيب الكيميائي للجسيمات الدقيقة، إذ ساهمت الكبريتات والنترات معا بنسبة تراوحت بين 21.82% و25.68% من كتلةPM2.5 ، وكانت أعلى مساهمة مشتركة في الزاوية. وتعكس هذه النتيجة وجود مكون غير عضوي ثانوي مهم داخلPM2.5 ، حيث يمكن أن تتكون الكبريتات والنترات في الغلاف الجوي من أكسدة الغازات السابقة مثل SO2 و NOx الناتجة عن الاحتراق والأنشطة الصناعية والمرورية. ويدعم ذلك الارتباط القوي بين PM2.5 وكل من الكبريتات والنترات، مما يشير إلى أن ارتفاع الكتلة الجسيمية كان مصحوبا بارتفاع منظم في هذه الأيونات. كما تعزز دراسة Okasha and Alhuweemdi (2019)أهمية هذا التفسير بالنسبة للمواقع الساحلية، إذ أوضحت إمكانية انتقال SO2 من مجمع مليته نحو زوارة وصبراته تبعا لاتجاه الرياح، وهو ما قد يوفر مادة غازية سابقة لتكوين الكبريتات داخلPM2.5.

أما المعادن الثقيلة فقد أظهرت بصمة كيميائية واضحة، حيث سجلت الزاوية أعلى تراكيز Cd و PbوNi، بينما سجلت صبراته أدنى المتوسطات. ويدعم ذلك الفرضية الثانية التي افترضت اختلاف التركيب الكيميائي لـ PM2.5 بين المدن، مع ارتفاع نسبي في المواقع الصناعية والمرورية. ويعد ارتفاع المعادن في الزاوية مؤشرا على أن زيادة PM2.5 في هذا الموقع ليست كمية فقط، بل نوعية أيضا، لأن الجسيمات الأعلى تركيزا كانت أكثر احتواء على عناصر ذات دلالة سمية ومصدرية. وقد كان الرصاص والنيكل أكثر بروزا في الزاوية مقارنة ببقية المدن، وهو ما يمكن ربطه بمصادر احتراقية وصناعية ومرورية. ويتوافق ذلك مع دراسات إقليمية حديثة بينت أهمية المعادن المرتبطة بـ PM2.5 في المواقع الصناعية والحضرية، مثل دراستي Shetaya et al. (2024) في القاهرة الكبرى و Kebe et al. (2025) في داكار.

وتشير الارتباطات الموجبة بين PM2.5 والمعادن الثقيلة إلى أن العينات الأعلى في الكتلة الجسيمية كانت غالبا أعلى في محتواها المعدني. ومع ذلك، كانت معاملات ارتباط المعادن أقل من معاملات ارتباط الكبريتات والنترات، مما يدل على أن الأيونات الثانوية ترتبط بدرجة أكبر بالكتلة الكلية لـPM2.5 ، في حين قد تكون المعادن أكثر ارتباطا بمصادر محلية محددة. وتدعم دراسة Fakhri et al. (2023) هذا التفسير، حيث أوضحت أن PM2.5 في المدن الساحلية المتوسطية يتأثر بتداخل مصادر المرور، والغبار

المعاد تعليقه، واحتراق الوقود، والنقل الإقليمي، وأن بعض العناصر مثل Ni و Pbيمكن أن تحمل دلالات مصدرية مهمة.
فيما يتعلق بالمؤشرات الصحية، أظهرت النتائج وجود ارتباطات موجبة قوية بين متوسطات PM2.5 الشهرية ومعدلات الربو وأمراض القلب لكل 100,000 نسمة، وهو ما يدعم الفرضية الثالثة للدراسة. ويمكن تفسير هذه العلاقة في ضوء الطبيعة الفيزيائية والكيميائية لـPM2.5 ، إذ تستطيع الجسيمات الدقيقة الوصول إلى الأجزاء العميقة من الجهاز التنفسي، كما أن محتواها من الكبريتات والنترات والمعادن الثقيلة قد يسهم في زيادة الإجهاد التأكسدي والاستجابات الالتهابية. ويتوافق ذلك مع ما أشار إليه Schwela (2024)حول أهمية حجم الجسيمات وتركيبها الكيميائي في تحديد آثارها الصحية، ومع الأدبيات التي تربط التعرض لـ PM2.5 بمخاطر تنفسية وقلبية.
مع ذلك، يجب تفسير العلاقة الصحية في إطار محدودية التصميم البيئي للدراسة. فقد ظهرت الارتباطات القوية عند استخدام المعدلات السكانية لكل 100,000 نسمة، بينما كانت الارتباطات ضعيفة عند استخدام الأعداد المطلقة للزيارات، مما يؤكد أهمية تصحيح المؤشرات الصحية وفقا لحجم السكان. كما أن البيانات الصحية المستخدمة كانت مجمعة على مستوى المدينة والشهر، ولم تتضمن معلومات فردية عن التعرض أو العمر أو التدخين أو الأمراض السابقة أو التعرض المهني والداخلي. لذلك، فإن النتائج لا تثبت علاقة سببية فردية مباشرة، لكنها تقدم دليلا بيئيا على أن ارتفاع PM2.5 يتزامن مع ارتفاع المؤشرات الصحية المرتبطة بالربو وأمراض القلب.
بناء على ما سبق، تؤكد الدراسة أن تقييم PM2.5 في غرب ليبيا يجب ألا يعتمد على التركيز الكتلي وحده، بل ينبغي أن يشمل التوصيف الكيميائي للمكونات الأيونية والمعدنية. فقد أظهرت النتائج أن الزاوية تمثل الموقع الأعلى أولوية للرصد بسبب ارتفاع PM2.5 وارتفاع محتواه من الكبريتات والنترات والمعادن الثقيلة، في حين تمثل صبراته الموقع الأقل تلوثا نسبيا ضمن فترة الدراسة. كما تشير نتائج زوارة إلى أهمية متابعة المواقع الساحلية القريبة من مصادر صناعية محتملة، خاصة عند تغير اتجاه الرياح. وبذلك، تقدم الدراسة دليلا كيميائيا وبيئيا على أن PM2.5 في غرب ليبيا خليط متعدد المصادر، يتكون من جسيمات أولية مرتبطة بالمعادن والغبار والانبعاثات المباشرة، ومكونات ثانوية مرتبطة بتحول الغازات السابقة إلى كبريتات ونترات.

**الاستنتاجات**

أظهرت هذه الدراسة أن مستويات PM2.5 في مدن غرب ليبيا المدروسة كانت مرتفعة ومتباينة مكانيا وزمنيا، مع تسجيل الزاوية أعلى متوسط لتركيز الجسيمات الدقيقة، تلتها زوارة وطرابلس، بينما سجلت صبراته أدنى المتوسطات. ويعكس هذا التباين تأثير طبيعة الموقع ومصادر الانبعاث المحتملة، خاصة في المناطق ذات الطابع الصناعي والمروري.
بين التوصيف الكيميائي أن PM2.5 في منطقة الدراسة لا يمثل كتلة جسيمية فقط، بل خليطا كيميائيا يحتوي على مكونات غير عضوية ثانوية ومعادن ثقيلة. فقد شكلت الكبريتات والنترات مساهمة واضحة من الكتلة الكلية للجسيمات، وكانت أعلى مساهمة لهما في الزاوية، مما يشير إلى دور محتمل للانبعاثات الغازية السابقة مثل SO2 و NOxفي تكوين جزء من.PM2.5
كما أوضحت النتائج أن الزاوية سجلت أعلى تراكيز للمعادن الثقيلة Cd و PbوNi، وهو ما يعزز دلالتها كموقع أكثر تأثرا بالمصادر الصناعية والمرورية مقارنة ببقية المواقع. وتؤكد هذه النتيجة أهمية عدم الاعتماد على تركيز PM2.5 الكلي وحده في تقييم جودة الهواء، بل ضرورة تحليل مكوناته الكيميائية لتحديد دلالته المصدرية والصحية.
أظهرت النتائج أيضا أن حالات الغبار ورياح القبلي ارتبطت بارتفاع متوسطاتPM2.5 ، مما يشير إلى مساهمة العوامل الجوية النوعية في زيادة الحمل الجسيمي خلال بعض الفترات. أما المتغيرات الجوية المستمرة، مثل الحرارة والرطوبة وسرعة الرياح والمطر، فقد أظهرت علاقات ضعيفة مع PM2.5 ضمن فترة الدراسة.

ارتبطت متوسطات PM2.5 الشهرية ارتباطا موجبا بمعدلات الربو وأمراض القلب لكل 100,000 نسمة على مستوى المدينة والشهر. غير أن هذه العلاقة تظل ارتباطا بيئيا مجمعا، ولا يمكن تفسيرها بوصفها دليلا مباشرا على السببية الفردية. وبناء على ذلك، تؤكد الدراسة الحاجة إلى برامج رصد مستمرة في غرب ليبيا تجمع بين القياس الكتلي لـPM2.5 ، والتوصيف الكيميائي، وربط بيانات جودة الهواء بالمؤشرات الصحية العامة.

**التوصيات**

1. إنشاء شبكة رصد منتظمة لـ PM2.5 في مدن غرب ليبيا، مع إعطاء أولوية للمواقع الصناعية والمرورية، وخاصة مدينة الزاوية .
2. اعتماد التوصيف الكيميائي الدوري للجسيمات الدقيقة، بحيث يشمل الكبريتات، النترات، المعادن الثقيلة، الكربون العضوي واللاعضوي، والأيونات غير العضوية الأخرى .
3. توحيد بروتوكولات أخذ العينات والتحليل المختبري، بما يتضمن الفلاتر الفارغة، العينات المكررة، حدود الكشف، حدود التقدير الكمي، ومعايير قبول النتائج .
4. توسيع فترة الرصد لتغطي دورة سنوية كاملة أو أكثر، بما يسمح بفهم التغيرات الموسمية في تراكيز PM2.5 وتركيبها الكيميائي .
5. تطبيق نماذج تحليل المصادر، مثل PMF أوCMB ، عند توفر عدد كاف من المكونات الكيميائية، لتقدير مساهمة المصادر الصناعية والمرورية والغبارية والساحلية .
6. ربط بيانات جودة الهواء بالبيانات الصحية المجمعة ضمن قاعدة بيانات موحدة، مع استخدام معدلات صحية معدلة سكانيا ومراعاة العوامل المربكة قدر الإمكان .
7. تطوير إجراءات وقائية للفئات الحساسة، خاصة مرضى الربو والقلب والأطفال وكبار السن، خلال فترات ارتفاع PM2.5 وحالات الغبار ورياح القبلي .
8.

**قائمة المراجع**


Brook, R. D., Rajagopalan, S., Pope, C. A., III, Brook, J. R., Bhatnagar, A., Diez-Roux, A. V., Holguin, F., Hong, Y., Luepker, R. V., Mittleman, M. A., Peters, A., Siscovick, D., Smith, S. C., Jr., Whitsel, L., & Kaufman, J. D. (2010). Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: An update to the scientific statement from the American Heart Association. *Circulation, 121*(21), 2331–2378. https://doi.org/10.1161/CIR.0b013e3181dbece1

Busheina, I. S., Kammashi, M., Etorki, A. M., & El-Rouissi, R. H. (2017). Assessment and measurement of atmospheric pollution (particulate matter) around Zawiya City-Libya. *Journal of Environmental & Analytical Toxicology, 7*(4), 473. https://doi.org/10.4172/2161-0525.1000473

Fakhri, N., Fadel, M., Öztürk, F., Keleş, M., Iakovides, M., Pikridas, M., Abdallah, C., Karam, C., Sciare, J., Hayes, P. L., & Afif, C. (2023). Comprehensive chemical characterization of PM2.5 in the large East Mediterranean-Middle East city of Beirut, Lebanon. *Journal of Environmental Sciences, 133*, 118–137. https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.07.010

Fares, F. F., El Oshebi, F. M., Algomati, A. E., & Saleh, A. S. (2024). Assessment of air quality and meteorology in Tripoli and Zliten cities, NW Libya. *Libyan Journal of Engineering Science and Technology, 4*(1), 61–66.

Goodarzi, B., Azimi Mohammadabadi, M., Jafari, A. J., Gholami, M., Kermani, M., Assarehzadegan, M.-A., & Shahsavani, A. (2023). Investigating PM2.5 toxicity in highly polluted urban and industrial areas in the Middle East: Human health risk assessment and spatial distribution. *Scientific Reports, 13*, 17858. https://doi.org/10.1038/s41598-023-45052-z

Kebe, M., Traore, A., Sow, M., Fall, S., & Tahri, M. (2025). Human health risk evaluation of particle air pollution (PM10 and PM2.5) and heavy metals in Dakar's two urban areas. *Asian*

*Journal of Atmospheric Environment, 19*(1), Article 7. https://doi.org/10.1007/s44273-025-00056-1
Okasha, A. Y., & Alhuweemdi, S. O. (2019). Effect of sulfur dioxide emissions from Mellitah Oil and Gas Complex on air quality in neighboring cities. *Journal of Marine Sciences and Environmental Technologies, 5*(1), A44–A54.
Schwela, D. (2024). Particulate matter pollution and health impacts in six North African countries. *European Journal of Development Studies, 4*(3), 1–22. https://doi.org/10.24018/ejdevelop.2024.4.3.350
Shetaya, W. H., El-Mekawy, A., & Hassan, S. K. (2024). Tempo-spatial variability and health risks of PM2.5 and associated metal(loid)s in Greater Cairo, Egypt. *Exposure and Health, 16*, 973–988. https://doi.org/10.1007/s12403-023-00603-7
U.S. Environmental Protection Agency. (2009). *Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I: Human Health Evaluation Manual (Part F, Supplemental Guidance for Inhalation Risk Assessment)*. EPA-540-R-070-002, OSWER 9285.7-82. Office of Superfund Remediation and Technology Innovation.
U.S. Environmental Protection Agency. (2024). *40 CFR Part 50, Appendix L: Reference Method for the Determination of Fine Particulate Matter as PM2.5 in the Atmosphere*. Code of Federal Regulations.
World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization. https://iris.who.int/handle/10665/345329
Asma Saleh Basos, & Rabea Ali Ibrahim Abdulsamad. (2025). A Multidimensional Descriptive Analysis of Pulmonary Fibrosis: Clinical Profiles, Risk Factors, and Functional Impacts in Affected Patients. *Journal of Libyan Academy Bani Walid*, *1*(3), 153–164. https://doi.org/10.61952/jlabw.v1i3.205

**Compliance with ethical standards**

*Disclosure of conflict of interest*

The authors declare that they have no conflict of interest.

**Disclaimer/Publisher's Note**: The statements, opinions, and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of ALBAHIT and/or the editor(s). ALBAHIT and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred to in the content