DOI: https://doi.org/10.33193/JALHSS.123.2025.1490
ISSN Online: 2414-3383
ISSN Print: 2616-3810
مجلة الفنون والأدب وعلوم الإنسانيات والاجتماع
Journal of Arts, Literature, Humanities and Social Sciences
www.jalhss.com
editor@jalhss.com
Volume (123) August 2025
العدد (123) أغسطس 2025

النمذجة التنبؤية لتركيزات PM10 في مدينة الرياض باستخدام التقنيات الجيومكانية وخوارزميات التعلم الآلي

أ.ذكرى عبدالجليل علي سلّام
الجغرافيا، العلوم الإنسانية والاجتماعية، جامعة الملك سعود، الرياض، المملكة العربية السعودية
البريد الاكتروني: thikra111@hotmail.com

د. محمد السيد حافظ
الجغرافيا، العلوم الإنسانية والاجتماعية، جامعة الملك سعود، الرياض، المملكة العربية السعودية
البريد الالكتروني: mohhafez@ksu.edu.sa

الملخص

يمثل تلوث الهواء الحضري تحديًا كبيرًا يؤثر سلبًا على جودة البيئة، والصحة العامة، والتنمية الاقتصادية، والإدارة الشاملة للمناطق الحضرية. ومن بين مختلف الملوثات، تُعد الجسيمات الدقيقة (PM_{10}) من أبرز ملوثات الهواء التي تشكل خطرًا على الصحة، لا سيّما في المراكز الحضرية الكبرى كمدينة الرياض. ونظرًا للتغيرات الموسمية في تراكز PM_{10}، تبرز الحاجة إلى إجراء نمذجة زمانية-مكانية وتحديد المناطق عالية الخطورة لدعم استراتيجيات التخفيف وتقليل الآثار الصحية.

هدفت الدراسة إلى نمذجة التوزيع المكاني والزماني لـ PM_{10} وإنتاج خرائط المخاطر في مدينة الرياض باستخدام أربع خوارزميات للتعلّم الآلي في بيئة البرمجة python: الغابة العشوائية (Random Forest - RF)، والتعزيز التدريجي الفائق (Extreme Gradient Boosting- XGBoost)، الجار الأقرب (k-nearest neighbors- k-NN)، آلة المتجهات الداعمة (Support Vector Machine - SVM)، وتم حساب المتوسطات الموسمية لتركزات PM_{10} لفصول الشتاء، الربيع، الصيف، الخريف، لتشكيل المتغير التابع. كما تم إدراج مجموعة من المتغيرات المستقلة المستمدة من بيانات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية، وشملت: معدلات درجة الحرارة، الرطوبة النسبية، سرعة الرياح، كمية الأمطار، العواصف الغبارية، مؤشر الغطاء النباتي المعدل للتربة، مؤشر المناطق المبنية والأراضي العارية المحسّن، كثافة السكان، كثافة شبكة الطرق، والمسافة إلى المناطق الصناعية. وقد تم تجميع هذه المتغيرات على المستوى الموسمي أيضًا.

وقد حققت خوارزميتي الغابة العشوائية والتعزيز التدريجي الفائق أعلى دقة تنبؤية، حيث بلغت قيم AUC لخوارزمية الغابة العشوائية: 0.921، 0.986، 0.961، و0.994 لفصول الشتاء، الربيع، الصيف، والخريف على التوالي، بينما بلغت قيم AUC لخوارزمية التعزيز التدريجي الفائق: 0.911، 0.985، 0,963، و0.994 لفصول الشتاء، الربيع، الصيف، والخريف على التوالي.

كما أشارت النتائج إلى أن أعلى مخاطر التعرض لـ PM_{10} وفقًا لنموذجي الغابة العشوائية والتعزيز التدريجي الفائق كانت في فصلي الصيف والخريف بالتساوي، ثم الربيع، وأخيرًا الشتاء. وفي فصول وتؤكد هذه النتائج فعالية نماذج التعلّم الآلي في التقاط ديناميكيات التلوث الموسمي، كما تقدم أدوات قيّمة لإدارة جودة الهواء في البيئات الحضرية.

الكلمات المفتاحية: تلوث، جودة الهواء، الجسيمات الدقيقة (PM10)، النمذجة المكانية والزمانية، البيانات المستقلة والتابعة.

DOI: https://doi.org/10.33193/JALHSS.123.2025.1490
ISSN Online: 2414-3383
ISSN Print: 2616-3810
مجلة الفنون والأدب وعلوم الإنسانيات والاجتماع
Journal of Arts, Literature, Humanities and Social Sciences
www.jalhss.com
editor@jalhss.com
Volume (123) August 2025
العدد (123) أغسطس 2025

Predictive Modeling of PM10 Concentrations in Riyadh City Using Geospatial Technologies and Machine Learning Algorithms

Dhikra Abdul-Jalil Ali Sallam
Geography, Humanities and Social Sciences, King Saud University, Riyadh, Saudi Arabia
Email: thikra111@hotmail.com

Dr. Mohamed El-Sayed Hafez
Geography, Humanities and Social Sciences, King Saud University, Riyadh, Saudi Arabia
Email: mohhafez@ksu.edu.sa

ABSTRACT

Urban air pollution poses a significant challenge, adversely affecting environmental quality, public health, economic development, and the comprehensive management of urban areas. Among various pollutants, particulate matter (PM_{10}) stands out as one of the most critical air pollutants due to its health risks, particularly in major metropolitan centers such as Riyadh. Given the seasonal fluctuations in PM_{10} concentrations, there is a pressing need for spatiotemporal modeling and the identification of high-risk areas to support mitigation strategies and minimize health impacts. The study aimed to model the spatiotemporal distribution of PM_{10} and generate risk maps for Riyadh using four machine learning algorithms within a Python programming environment: Random Forest (RF), Extreme Gradient Boosting (XGBoost), k-nearest neighbors (k-NN), and Support Vector Machine (SVM). Seasonal averages of PM_{10} concentrations were calculated for winter, spring, summer, and autumn to serve as the dependent variable. A set of independent variables, derived from remote sensing and geographic information systems (GIS) data, was incorporated. These included temperature rates, relative humidity, wind speed, precipitation, dust storm frequency, Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI), Enhanced Built-up and Bare Land Index (EBBI), population density, road network density, and distance to industrial areas. These variables were also aggregated at the seasonal level. The findings further indicated that the highest risk of PM_{10} exposure, as predicted by both the Random Forest and XGBoost models, occurred during summer and autumn (equally), followed by spring, with winter presenting the lowest risk levels. These results underscore the effectiveness of machine learning models in capturing the seasonal dynamics of pollution and offer valuable tools for air quality management in urban environments.

Keywords: Pollution, Air Quality, Fine Particulate Matter (PM10), Spatio-temporal Modeling, Independent and Dependent Data.

DOI: https://doi.org/10.33193/JALHSS.123.2025.1490
ISSN Online: 2414-3383
ISSN Print: 2616-3810
مجلة الفنون والأدب وعلوم الإنسانيات والاجتماع
Journal of Arts, Literature, Humanities and Social Sciences
www.jalhss.com
editor@jalhss.com
Volume (123) August 2025
العدد (123) أغسطس 2025

أهداف الدراسة

يتمثل هدف الدراسة الرئيس في تطوير وتقييم نماذج تنبؤية لمخاطر تركزات PM_{10} في مدينة الرياض باستخدام خوارزميات التعلم الآلي والبيانات البيئية الجغرافية المكانية، مع التركيز على التوزيع المكاني والتغيرات الموسمية، ومن ثم تتضمن الأهداف الفرعية للدراسة، فيما يلي:

1- تقييم التباين المكاني والزماني لتركزات PM_{10} في الرياض خلال الفترة من 2017 إلى 2021 عبر المواسم المختلفة، باستخدام تقنيات الاستيفاء المكاني وإعداد الخرائط.

2- تحديد العلاقة بين العوامل المؤثرة ومستويات تركز PM_{10}، والمتغيرات الجيومكانية الأكثر تأثيرًا في توزيع PM_{10}، ضمن أطر التعلم الآلي.

3-بناء ومقارنة نماذج تعلم آلي متعددة للتنبؤ بتركزات PM_{10} بالاعتماد على البيانات الجيومكانية.

4- تقييم تأثير التغيرات الموسمية على دقة النماذج التنبؤية المطورة، وتحديد الفترات الزمنية التي تمثل تحديات أكبر في التنبؤ بمستويات التلوث.

5- توليد توصيات قائمة على البيانات يمكن أن تدعم صانعي القرار في إدارة جودة الهواء وتطوير سياسات الصحة العامة في البيئات الحضرية الجافة كالرياض، من خلال النماذج التنبؤية الأنسب ورسم خرائط المخاطر المكانية.

أهمية الدراسة

لا يزال تلوث الهواء الحضري يمثل تحديًا جوهريًا أمام تحقيق التنمية المستدامة، والصحة العامة، والعدالة البيئية. ففي مدينة الرياض، تتجاوز تركيزات الجسيمات الدقيقة PM_{10} الحدود الإرشادية التي وضعتها منظمة الصحة العالمية ومجلس التعاون الخليجي وزارة البيئة والمياه والزراعة في المملكة العربية السعودية، مع تفاوت مكاني ملحوظ في توزيع التلوث بين الأحياء. وفي ظل تزايد التحديات البيئية والصحية المرتبطة بتلوث الهواء، يصبح وجود نموذج كأداة إنذار مبكر دقيق وموثوق أمرًا بالغ الأهمية لحماية السكان، ومع ذلك، فإن الأدبيات القائمة تعتمد بشكل رئيسي على محطات الرصد الثابتة ونماذج إحصائية تقليدية، وهي أدوات محدودة في قدرتها على تمثيل التغاير المكاني – الزمانى الدقيق في التعرض للتلوث. كما أن عدد قليل فقط من الدراسات قام بتطبيق تقنيات التعلم الآلي ضمن إطار جيومكاني للتنبؤ بمخاطر PM_{10}، في بيئات مختلفة، وأقل منها من تناول هذا التكامل في السياق الحضري الخليجي، ومن ثم تسعى الدراسة إلى سد هذه الفجوات من خلال تطبيق ومقارنة نماذج تعلم آلي تجميعي مدعّمة بتحليل مكاني ثنائي المتغير، بهدف تقديم تقييم عالي الدقة لمخاطر PM_{10} في جميع أنحاء مدينة الرياض.

وبناءً عليه، تُقدم الدراسة مساهمة نظرية من خلال دمج خوارزميات التعلم الآلي مع أدوات التحليل المكاني بهدف تطوير نماذج بيئية حضرية أكثر تقدمًا. وتتحدى هذه المقاربة الأساليب التقليدية في نمذجة تلوث الهواء التي اعتمدت فقط على النمذجة الحتمية أو الإحصائية، عبر إثبات فعالية التعلم الآلي في التقاط التفاعلات غير الخطية المعقدة بين المتغيرات البيئية التفسيرية المحلية وتركز مستويات PM_{10}. علاوة على ذلك، تقدم الدراسة إطارًا منهجيًا يربط بين نمذجة البيانات البيئية ونظرية الاستدامة الحضرية، مسهمة في إثراء الإنتاج العلمي متعدد التخصصات في مجالات تحليلات المدن الذكية والعدالة البيئية المكانية. علاوة على ذلك، يدمج العمل تقنيات التحليل المكاني الثنائي (نسبة التكرار Frequency Ratio - FR) لاختيار المتغيرات التنبؤية وتحديد أوزانها، مما يُعزّز من شفافية النماذج وكفاءتها التنبؤية. بالإضافة إلى ذلك، فأن عملية التقييم المقارن لأداء النماذج تعزز من فهم الباحثين المستقبليين لآليات اختيار النماذج وتحليل موثوقيتها ودقتها في الأنظمة الحضرية المعقدة وفي ظروف جغرافية وبيئية متغيرة. ومن ثم تُسهم الدراسة في تلبية الطلب الأكاديمي المتزايد على تطبيقات التعلم الآلي في العلوم البيئية، من خلال تقديم نموذج قابل للتكرار يمكن اعتماده في مدن أخرى تواجه تحديات مماثلة.

DOI: https://doi.org/10.33193/JALHSS.123.2025.1490
ISSN Online: 2414-3383
ISSN Print: 2616-3810
مجلة الفنون والأدب وعلوم الإنسانيات والاجتماع
Journal of Arts, Literature, Humanities and Social Sciences
www.jalhss.com
editor@jalhss.com
Volume (123) August 2025
العدد (123) أغسطس 2025

وعلى مستوى التطبيقات العملية تُقدم الدراسة نتائج ذات قيمة تطبيقية عالية يمكن تسخيرها من قِبل الجهات المعنية بالتخطيط الحضري، والإدارة البيئية، والصحة العامة، مما يعكس أثرًا مباشرًا وملموسًا يتجاوز الإسهام النظرى. فعلى مستوى الحكومات المحلية والمخططين الحضريين، توفر الدراسة أدوات تحليل مكانية دقيقة يمكن توظيفها في تقييم الأثر البيئي للمشروعات التنموية الكبرى، وتقديم دلائل استرشادية مبنية على بيانات مكانية لتوجيه قرارات تخطيط المدن، لاسيّما في سياق تصميم استراتيجيات التحكم في الانبعاثات ضمن المناطق المعرضة لمستويات عالية من تلوث الهواء بالجسيمات الدقيقة PM_{10}. كما تُشكّل النتائج مرجعًا علميًا يُمكّن وكالات إدارة جودة الهواء من الوصول إلى أدوات بديلة فعالة ومنخفضة التكلفة، تُكمّل شبكات الرصد الميداني التقليدية، لا سيما في المدن التي تتسم بتضاريس غير متجانسة وتعدد في مصادر التلوث (كالازدحام المروري، والأنشطة الصناعية). ويكتسب هذا البعد أهمية متزايدة مع محدودية تغطية المحطات التقليدية للرصد في مناطق حضرية معقدة كما هو الحال في الرياض. وهنا، يؤدى النموذج المقترح دورًا محوريًا كأداة استباقية قادرة على إنتاج خرائط خطر عالية الدقة للتعرّض لـ PM_{10}، تُظهر بوضوح النقاط الساخنة للتلوث في أنحاء المدينة، مما يُمكّن الجهات المعنية من التدخل في الوقت المناسب.

أما على صعيد السلطات الصحية العامة، فإن الدراسة تمثل نقلة نوعية في دعم الانتقال من نماذج التدخل القائمة على "المعالجة اللاحقة" إلى استراتيجيات قائمة على "الاستجابة الاستباقية". ومن خلال النتائج التفصيلية التي تحدد الأحياء ذات التعرض المرتفع لتلوث الهواء، يمكن للجهات الصحية استهداف التدخلات المجتمعية بشكل أكثر فاعلية، وتطوير حملات توعية موجهة للسكان حول المخاطر البيئية والصحية المرتبطة بالجسيمات الدقيقة، بما يساهم في تعزيز الوقاية وتقليص معدلات الأمراض المرتبطة بالتلوث الهوائي. حيث توفر خرائط مخاطر PM_{10} عالية الدقة التي تنتجها النمذجة إطارًا تطبيقيًا ثريًا يمكن توظيفه في عدة جوانب عملية، من بينها:

- تحديد المواقع المناسبة لتوسيع أو إنشاء مناطق الانبعاثات المنخفضة (Low Emission Zones).
- دعم فرض قيود أكثر صرامة على مصادر الانبعاثات الصناعية في المناطق الحساسة.
- تصميم مشاريع البنية التحتية الخضراء مثل الأحزمة النباتية أو المساحات الحضرية المستدامة.
- إعادة تخطيط مسارات المرور لتقليل التعرض للتلوث في الأحياء السكنية.
- توجيه التدخلات الصحية والبيئية استنادًا إلى بيانات قابلة للتنفيذ على مستوى الحي الإدارى.

كما تُسهم هذه البيانات في تعزيز قدرة السلطات المحلية على تنفيذ برامج عمل فاعلة، مثل بروتوكول العمل للحد من تلوث الهواء في مدينة الرياض أو مشروع "موجة الرياض الخضراء". كما يتميّز الإطار المقترح بمرونة عالية وإمكانية تكييفه وتطبيقه في مدن أخرى ضمن مبادرات إدارة جودة الهواء في العالم العربي والعالمي على حد سواء. علاوة على ذلك، تعالج هذه الدراسة قضايا مجتمعية ملحّة تتعلق بالعدالة البيئية والصحة العامة، إذ تسلط الضوء على التفاوتات المكانية في توزيع التعرض لتلوث الهواء، ما يُعد أساسًا لتطوير سياسات حضرية أكثر إنصافًا وشمولًا. فهي تدعم جهود الجهات الصحية والمجتمعية في تقليص الفجوات الصحية المرتبطة بالعوامل البيئية، وتُسهم في دعم تخطيط حضري يرتكز إلى مبادئ الاستدامة والعدالة البيئية.

وباختصار، تُحوّل هذه الدراسة المعقدات العلمية المرتبطة بتلوث الهواء إلى أدوات تطبيقية عملية قابلة للتنفيذ، وتُجسّد كيفية تسخير التقنيات الحديثة، من خلال التكامل بين التعلم الآلي والتحليل المكاني، لخدمة الصحة العامة والاستدامة البيئية في المدن المعاصرة. إنها تجعل "ما هو غير مرئي مرئيًا"، وتترجم التعقيد العلمي إلى وضوح استراتيجي يدعم القرار ويُحدث الأثر.

وتقع الدراسة عند تقاطع ثلاثة مجالات حيوية: الذكاء الاصطناعي الجغرافى، والعلوم البيئية الحضرية، والسياسات العامة. ومن خلال ذلك، تُسهم في الخطاب المتنامي حول كيفية تسخير المدن للبيانات من أجل تنمية مستدامة وعادلة. كما تدعم هذه الدراسة التحول نحو تخطيط حضري قائم على الأدلة، وتتوافق مع الدعوات الدولية للتحول الرقمي في الحوكمة البيئية. وتُثري النقاشات الأكاديمية حول تحليل المخاطر المكانية، وإعداد خرائط التلوث، وتطبيق أدوات الذكاء الاصطناعي في أبحاث العدالة البيئية. وعلى الرغم من أن الدراسة تقدم

DOI: https://doi.org/10.33193/JALHSS.123.2025.1490
ISSN Online: 2414-3383
ISSN Print: 2616-3810
مجلة الفنون والأدب وعلوم الإنسانيات والاجتماع
Journal of Arts, Literature, Humanities and Social Sciences
www.jalhss.com
editor@jalhss.com
Volume (123) August 2025
العدد (123) أغسطس 2025

إطارًا متينًا لتقييم مخاطر PM_{10} في الرياض، إلا أنها تفتح آفاقًا واعدة لمزيد من البحث، منها: تطبيق النموذج على ملوثات أخرى $PM_{2.5}$ أو NO_2، ودراسة المخاطر الناتجة عن التعرض المشترك، دمج بيانات الاستشعار الآني من الأقمار الصناعية وأجهزة الاستشعار الأرضية لتقديم تنبؤات ديناميكية، إجراء دراسات على الأمد الطويل تربط بين التعرض للتلوث والنتائج الصحية عبر الأبعاد المكانية والزمانية، وتحليل الاستجابات السوسيولوجية والسلوكية للبيانات المكانية المتعلقة بالتلوث الحضري. من شأن هذه المسارات أن تُعمّق من أثر هذا العمل، وتوسع نطاق استخدامه في أبحاث أوسع حول البيئة والصحة العامة.

وباختصار، تكمن أهمية هذه الدراسة في قدرتها على التعرف الدقيق على مشكلة واقعية، وتقديم حل تقني مبتكر ومدقق، وربط نتائجها بالسياق المجتمعي الأوسع. فهي تمثل تقدمًا علميًا ذا مغزى في فهم تلوث الهواء الحضري، وتوفر أدوات عملية لتحسين المرونة الحضرية، والصحة العامة، وتحقيق العدالة البيئية.

الدراسات السابقة:

تُعد نمذجة تلوث الهواء أداة عملية وأساسية لتوقّع وتقدير التوزيع المكاني والزماني للملوثات الجوية. وتُستخدم هذه النماذج على نطاق واسع لمحاكاة أنماط انتشار الانبعاثات وتقييم آثارها على صحة الإنسان، وجودة البيئة، والأداء الاقتصادي (Rybarczyk & Zalakeviciute, 2018)، وتُعد هذه القدرة التنبؤية عنصرًا محوريًا في إدارة البيئة بشكل استباقي، وفي صياغة مبادرات الصحة العامة. علاوة على ذلك، فإن إتاحة التوقعات المتعلقة بجودة الهواء بشكل شفاف للجمهور تُسهم في تعزيز الوعي المجتمعي. فعندما يكون المواطنون على دراية بحالة الهواء الراهنة والمُتوقعة، فإن ذلك يُشجّعهم على المشاركة الفاعلة في الجهود الرامية إلى تقليل التلوث، بما يعزّز فعالية التدخلات البيئية على مستوى المجتمع بأكمله (Shogrkhodaei et al., 2021).

وفي الوقت الراهن، وبفضل انتشار محطات الرصد الأرضية في مناطق مختلفة من المدن، تُقاس تراكزت الملوثات بدقة مقبولة(Ghaemi, Alimohammadi, & Farnaghi, 2018) ، إلا أن من أبرز المشكلات المرتبطة بهذه المحطات هو محدوديتها وتوزيعها غير المتجانس، مما يُقيّد القدرة على تقدير الملوثات على نطاق جغرافي واسع وبشكل متواصل، ويحول دون إعداد خرائط مستمرة لمخاطر التلوث. ففي المدن الكبرى أو المناطق ذات التضاريس المتنوعة، يمكن أن تختلف مستويات التلوث بشكل كبير خلال مسافات قصيرة بسبب اختلاف مصادر الانبعاثات المحلية، وكثافة حركة المرور، والظروف الجوية. ومع ذلك، غالبًا ما تعجز المحطات الثابتة عن التقاط هذا التباين المكاني الدقيق. فعلى سبيل المثال، أظهرت دراسة أُجريت في مدينة أصفهان، إيران، أن الاعتماد الحصري على المحطات الأرضية أخفى العديد من بؤر التلوث الدقيقة لجسيمات $PM_{2.5}$، بينما أدى دمج وحدات استشعار متنقلة مع المحطات التقليدية إلى تحسين دقة نماذج جودة الهواء بنسبة تجاوزت 60% (Haghbayan & Tashayo, 2021). وتزداد حدة هذه التحديات في البيئات الجافة وشبه القاحلة، حيث تتأثر مستويات PM_{10} بشكل كبير بإعادة تعليق الغبار الطبيعي، والرياح الصحراوية، وأنماط استخدام الأراضي. وتُعقّد هذه الظروف قدرة المحطات الأرضية على رصد أحداث التلوث اللحظية، خاصةً عندما يكون توزيع المحطات قليل الكثافة. كما أن مصادر الجسيمات في هذه المناطق غالبًا ما تكون مزدوجة؛ إذ تنبع من كلٍ من المصادر البشرية (مثل المرور والصناعة) والمصادر الطبيعية (كالغبار المحمول بالرياح)، مما يصعّب من مهام تحديد مصادر التلوث وتقييم المخاطر البيئية. فعلى سبيل المثال، كشفت دراسة أُجريت في مناخ البحر الأبيض المتوسط، مثل مدينة أثينا اليونانية، أن دقة القياسات تأثرت سلبًا بظروف الطقس الجاف، وتراكم الغبار على أجهزة الرصد، ودرجات الحرارة المرتفعة، مما أظهر الحاجة إلى إعادة معايرة متكررة لهذه الأجهزة (Christakis, Stavrakas, Hloupis, & Tsakiridis, 2020).

ويُمكن من خلال استخدام نظم المعلومات الجغرافية وتقنيات الاستشعار عن بُعد ، تحليل التغيرات والأنماط المكانية والزمانية لانتشار تلوث الهواء بكفاءة وبتكلفة ووقت منخفضين(Sudhira et al., 2003) ، حيث تتيح نظم المعلومات الجغرافية تطبيق أساليب الاستيفاء لدراسة التوزيع المكاني للملوّثات، إلى جانب إدارة البيانات المكانية وأخذ تأثير عوامل النمذجة الفعّالة بعين الاعتبار(Mozumder et al., 2013) ، ومن جهة أخرى تُكمل تقنيات الاستشعار عن بُعد دور نظم المعلومات الجغرافية، حيث تُعد تقنيات الاستشعار عن بُعد أداة فعّالة لمراقبة الظواهر المتغيرة على سطح الأرض وإدارتها زمنيًا(Sohrabinia & Khorshiddoust, 2007) .

DOI: https://doi.org/10.33193/JALHSS.123.2025.1490
ISSN Online: 2414-3383
ISSN Print: 2616-3810
مجلة الفنون والأدب وعلوم الإنسانيات والاجتماع
Journal of Arts, Literature, Humanities and Social Sciences
www.jalhss.com
editor@jalhss.com
Volume (123) August 2025
العدد (123) أغسطس 2025

فالمجسات الفضائية مثل MODIS و Landsatترصد مؤشرات قيّمة مثل السماكة البصرية للهباء الجوي (rosol optical thickn ess (AOT، ودرجة حرارة سطح الأرض، وتوقيعات ملوّثات ترتبط ارتباطًا وثيقًا بتراكيز ملوّثات الهواء عند مستوى السطح مثل الجسيمات الدقيقة(PM) ، وأكاسيد النيتروجين، وأول أكسيد الكربون. وقد أظهرت الدراسات أن بيانات AOT المستخلصة من الأقمار الصناعية وبيانات الأشعة تحت الحمراء الحرارية ترتبط بشكل كبير بقياسات الأرض الخاصة بـ$PM_{2.5}$ و PM_{10} والكربون الأسود، مما يعزز التغطية المكانية والدقة في خرائط تلوّث الهواء(Wijeratne & Bijker, 2006).

وتُعدّ دراسة زوران وزوران (Zoran & Zoran, 2005) من أوائل الجهود المؤثرة التي سعت إلى دمج تقنيات الاستشعار عن بُعد مع بيانات الرصد الميداني (in-situ monitoring) لرسم خرائط ثلاثية الأبعاد (3D) لتوزيع تلوّث الهواء الحضري. فعلى الرغم من أن أساليب الذكاء الاصطناعي وتعلم الآلة لم تكن قد ترسّخت بعد في هذا المجال، فقد أسّست هذه الدراسة قاعدة معرفية مبكرة من خلال إثبات إمكانية الاستفادة من صور الأقمار الصناعية، ومنها: Landsat TM، ETM، MODIS، وSPOT، إلى جانب البيانات المناخية الأرضية، عبر نماذج حيوية بصرية (bio-optical modeling) والانحدار الخطي (linear regression)، لتقدير تركيزات الملوثات الجوية وتحليل سلوكها المكاني. وقد تمحورت الدراسة حول العاصمة الرومانية بوخارست، حيث ركز الباحثان على دور سُمك الهباء البصري (Aerosol Optical Thickness)، وتضاريس السطح، وديناميكيات التهوية الحضرية المتأثرة بالخشونة الإيروديناميكية للبيئة العمرانية (aerodynamic roughness) في تشكيل أنماط انتشار التلوث. وقد أبرزت النتائج وجود علاقات ارتباط إحصائية قوية بين أطوال موجية مُشتقة من صور الأقمار الصناعية (وخاصة النطاقات الأخضر، والأحمر، وتحت الأحمر الحراري) وتركزات المواد الجسيمية (Particulate Matter)، والكربون الأسود، وأول أكسيد الكربون. ما مثّل آنذاك دليلاً جوهريًا على إمكان استخدام بيانات الفضاء في تقييم جودة الهواء. وباختصار، أسهمت الدراسة في ترسيخ الأسس العلمية لاستخدام الاستشعار عن بُعد في رصد جودة الهواء في المدن، ولا تزال تُعد مرجعًا أساسيًا لفهم كيف ساهمت الأساليب الجيومكانية التقليدية في تمهيد الطريق نحو التطورات الحالية في نمذجة جودة الهواء. حيث شكلت حجر الأساس الذي بُنيت عليه التطبيقات المعاصرة في مجال النمذجة الجغرافية البيئية. فهي من أوائل الدراسات التي أثبتت أن الإشارات الطيفية الحرارية والبصرية المُلتقطة بالأقمار الصناعية يمكن أن ترتبط ارتباطًا معنويًا بتركيزات الملوثات الأرضية.

وتمثل الدراسة التي أجراها جوهير وآخرون (Goheer et al., 2025) خطوة متقدمة ومهمة في فهم ديناميكيات الضباب الدخاني ومصادر تلوّث الهواء في جنوب آسيا. فبينما ربطت الدراسات السابقة ارتفاع مستويات التلوّث في باكستان بالتوسّع الحضري والانبعاثات الناتجة عن المركبات واحتراق الكتلة الحيوية، تميّزت دراسة جوهير باستخدام مجموعات بيانات جيومكانية مدمجة - شملت بيانات الأقمار الصناعية منMODIS ، ونماذج إعادة التحليل منMERRA-2 ، ونظام تتبّع الجسيمات HYSPLIT - مما مكّن الباحثين من رسم خريطة دقيقة لاتجاهات الملوّثات على المستويين الزماني والمكاني. وقد أكّدت نتائج الدراسة ما توصلت إليه أبحاث سابقة بخصوص اعتبار مدينتي لاهور وفيصل آباد نقاطًا ساخنة للتلوّث، لكنها تجاوزت ذلك عبر تقديم كميات دقيقة لانبعاثات الجسيمات الدقيقة ($PM_{2.5}$) الموسمية، وتسليط الضوء على مساهمة متزايدة لمناطق ريفية مثل حافظ آباد وناروال في هذا التلوّث، نتيجة ممارسات مثل حرق بقايا المحاصيل الزراعية.

وفي دراسة أجراها نغوين وآخرون (Nguyen et al., 2025)، قدّم الباحثون تحليلًا جيومكانيًا شاملًا لتلوّث الهواء في محافظة دونغ ناي الفيتنامية، مع التركيز على التغيرات الموسمية ومصادر التلوث خلال الفترة الممتدة من عام 2022 إلى عام 2023. قام الفريق البحثي برصد جودة الهواء في 55 موقعًا مختلفًا، حيث تم قياس تراكيز كل من الجسيمات العالقة الكلية (TSP)، وثاني أكسيد الكبريت (SO_2)، وثاني أكسيد النيتروجين (NO_2)، وأول أكسيد الكربون (CO) خلال موسمي الجفاف والمطر. وقد تم تمثيل هذه القياسات مكانيًا باستخدام أدوات نظم المعلومات الجغرافية (GIS) وتقنية الوزن العكسي للمسافة (Inverse Distance Weighting – IDW) لتصوير شدة التلوث وتوزيعه الجغرافي. أظهرت النتائج وجود تأثير موسمي واضح على تركيزات الملوّثات، حيث سجّل كل من TSP وNO_2 مستويات تجاوزت باستمرار الحدود السنوية التي يحددها المعيار الوطني الفيتنامي لجودة الهواء، لا سيّما خلال مواسم الجفاف، مع ملاحظة اتجاه تصاعدي في هذه التراكيز على

DOI: https://doi.org/10.33193/JALHSS.123.2025.1490
ISSN Online: 2414-3383
ISSN Print: 2616-3810
مجلة الفنون والأدب وعلوم الإنسانيات والاجتماع
Journal of Arts, Literature, Humanities and Social Sciences
www.jalhss.com
editor@jalhss.com
Volume (123) August 2025
العدد (123) أغسطس 2025

مدار عامين. وقد بلغت أعلى قراءة لـ TSP (202.53 ميكروغرام/م³) في مناطق معالجة النفايات خلال موسم الجفاف لعام 2023، في حين سُجل أدنى تركيز (25.21 ميكروغرام/م³) في مناطق الظهير خلال عام 2022. أما NO_2، فقد كانت تراكيزه مرتفعة بوجه خاص في المناطق السكنية، بينما وصلت تراكيز CO إلى ذروتها في المناطق القريبة من المطارات (6126.15 ميكروغرام/م³ في عام 2023)، وانخفضت بشكل ملحوظ في مناطق النفايات خلال موسم الأمطار (100.00 ميكروغرام/م³). ومن النتائج اللافتة في الدراسة، وجود ارتباط قوي بين تراكيز CO ومستويات التلوث الضوضائي (معامل ارتباط $r = 0.90$، $p < 0.01$)، ما يشير إلى علاقة مباشرة بحركة المرور والنشاط البشري اليومي. في المقابل، لم يُسجَّل أي ارتباط معنوي بين الملوّثات الأخرى. وتؤكد هذه النتائج أن الأنشطة اليومية — وعلى رأسها التنقل المروري — تُعدّ المساهم الرئيس في تلوّث الهواء المحلي بمحافظة دونغ ناي.

علاوة على ذلك، تم توظيف أنظمة متكاملة تجمع بين نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بُعد بنجاح لتتبع ديناميكيات تلوث الهواء عبر الزمن. فعلى سبيل المثال، تُقدّم المراجعة التي أعدّها تيكادير، موكوبادياي، وإسلام (Tikader, Mukhopadhyay, & Islam, 2023) تحليلًا تركيبيًا معمقًا حول الكيفية التي يمكن من خلالها توظيف تقنيتَي الاستشعار عن بُعد ونظم المعلومات الجغرافية كأدوات محورية لرصد تلوّث الهواء، ونمذجته، والتخفيف من آثاره، وبوجه خاص فيما يتعلق بالملوّثات الجسيمية (Particulate Matter - PM) في الهند. ويُشير الباحثون إلى أن الأنشطة الصناعية، ووسائل النقل، والتعدين، وحرائق الغابات، والانبعاثات المنزلية، تُعدّ من أبرز مصادر الجسيمات الملوِّثة في الهند، خصوصًا في المناطق الحضرية، ما يشكّل تهديدًا حادًّا للصحة العامة. وتُبرز المراجعة كيف تم توظيف تقنيتَي الاستشعار عن بُعد ونظم المعلومات الجغرافية بنجاح في: رسم خرائط للبؤر الساخنة للتلوّث (Pollution Hotspots)، التنبؤ بأنماط توزيع الجسيمات الدقيقة، تتبّع مصادر الانبعاثات، وتقدير مستويات التعرّض البيئي على مستوى المجتمعات المحلية، وتُعزّز هذه المراجعة أهمية الاستشعار عن بُعد ونظم المعلومات الجغرافية في حوكمة جودة الهواء، وتدعو إلى تكاملها المنهجي مع بيانات المناخ والصحة العامة من أجل تعظيم فائدتها في جهود الحد من التلوث وحماية الصحة المجتمعية.

في دراسة أجراها تيكادر ومخوبادياي ودابهادكار(Tikader, Mukhopadhyay, & Dabhadker, 2024) ، تناول الباحثون تحديات تلوّث الهواء في ولاية تشاتيسغره الصناعية بالهند وتُعد أكثر الولايات الهندية تركزًا في النشاط الصناعي وتواجه مستويات مرتفعة من تلوّث الهواء ، عبر دمج تقنيتَي الاستشعار عن بُعد ونظم المعلومات الجغرافية، استعان الفريق بصور الأقمار الصناعية لرصد ملوّثات رئيسية مثل ثاني أكسيد الكبريت (SO_2)، وأكاسيد النيتروجين(NO_x) ، والجسيمات العالقة (PM_{10}) ، وتمت معالجة البيانات عبر برمجيات GISلإنتاج خرائط مخاطر تلوّث الهواء. هذه الخرائط مكّنت السلطات المحلية من تحديد المناطق ذات الخطر الأعلى- وخاصة المناطق القريبة من محطات الطاقة ومصانع الفولاذ -كما ساعدت في تقييم كفاءة التدخلات التنظيمية على مدار الزمن.

وفى المملكة العربية السعودية، أثبت تكامل نظم المعلومات الجغرافية، وتقنيات الاستشعار عن بُعد، والأدوات الجيوإحصائية فعاليته الكبيرة في تقييم وتصور ديناميكيات تلوّث الهواء. تساعد هذه الأدوات الباحثين على تجاوز القيود التي تفرضها محطات الرصد الأرضية الثابتة، والتي غالبًا ما تكون موزعة بشكل متباعد، ومن أبرز الأمثلة على هذا التكامل الدراسة مايلى:

- أجرت سلمان وآخرون Salman et al.(2016) دراسة ميدانية في جنوب شرق الرياض، قامت من خلالها بتحليل مصادر التلوث وتأثيرها على السكان باستخدام نهج مختلط ضم استبيانات ميدانية (405 استبيانًا)، وصور حرارية من Landsat 8، إلى جانب تحليل جغرافي باستخدام خرائط التوزيع المكاني عبر تقنية "الكريجينغ العادي" (Ordinary Kriging) ضمن برنامج ArcGIS. استهدفت الدراسة تحديد المناطق الأكثر تلوثًا وربطها بأنشطة صناعية، مثل مصنع اليمامة للأسمنت، ومحطة الطاقة في حي الفاروق. أظهرت النتائج أن أعلى تركيزات (PM_{10} (>403 µg/m³ سُجلت في شمال وغرب منطقة الدراسة، مما تسبب في مشكلات صحية للسكان القريبين.

DOI: https://doi.org/10.33193/JALHSS.123.2025.1490
ISSN Online: 2414-3383
ISSN Print: 2616-3810
مجلة الفنون والأدب وعلوم الإنسانيات والاجتماع
Journal of Arts, Literature, Humanities and Social Sciences
www.jalhss.com
editor@jalhss.com
Volume (123) August 2025
العدد (123) أغسطس 2025

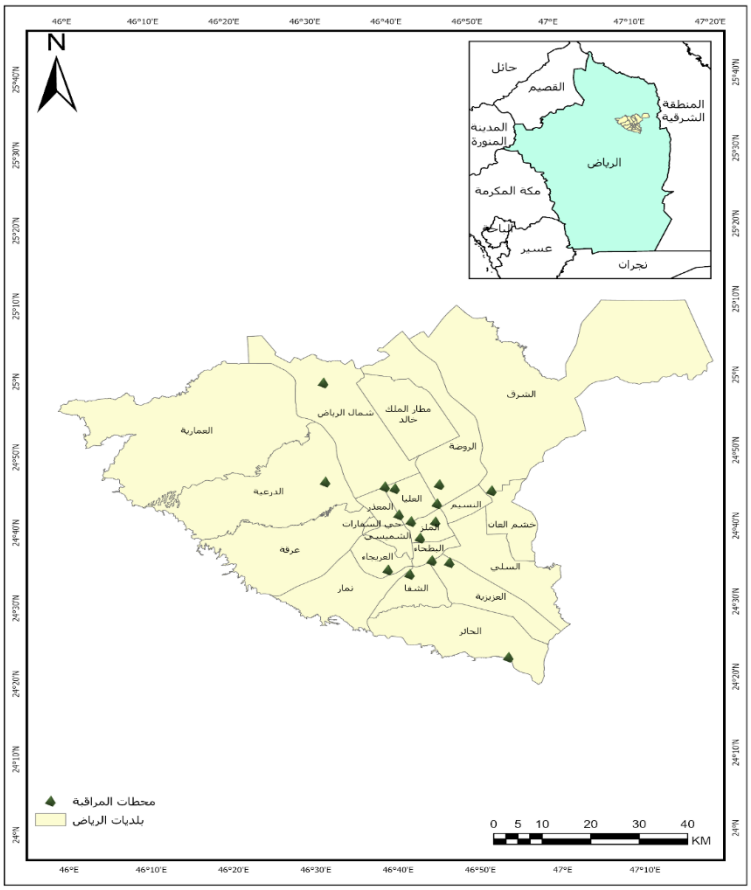
- واستخدمت دراسة منير وآخرون (2016) .Munir et al ، نهجًا إعتمد بالكامل على تقنيات الاستشعار عن بعد دون تدخل مباشر للبيانات الأرضية في معظم المواقع. حيث إعتمد على بيانات العمق البصرى للهباء الجوى Aerosol Optical Depth (AOD) المستخرجة من القمر الصناعي MODIS لتقدير تركيزات $PM_{2.5}$في 20 مدينة سعودية خلال الفترة بين 2001 و2012. وقامت الدراسة بتطبيق نماذج انحدار تربط (AOD) بتركزات$PM_{2.5}$ ، مع التحليل الزماني والمكاني للتغيرات. أظهرت النتائج أن الدمام سجلت أعلى التركيزات، بينما كانت تبوك الأدنى، مع وجود ميل سلبي عام من الجنوب نحو الشمال. على المستوى الزمني، لوحظت زيادات في معظم المدن باستثناء الطائف والمدينة المنورة. وأجرت الدراسة مقارنة مباشرة بين بيانات الأقمار الصناعية والرصد الأرضي في مكة المكرمة فقط، حيث أظهرت الأقمار الصناعية تركيزات أقل من الرصد الأرضي بحوالي 2.5 مرة، ما يعكس التحديات في استخدام AOD في البيئات الجافة كالسعودية.

- وتناول الزهراني (2022) دراسة التوزيع المكاني للجسيمات الدقيقة في مدينة الرياض (2016-2017)، ركزت هذه الدراسة على تحليل التوزيع المكاني لتركيز الجسيمات العالقة الدقيقة ($PM_{2.5}$ وPM_{10}) في مدينة الرياض خلال الفترة ما بين 2016 و2017، مع تقييم علاقتها بالعوامل المناخية والتضاريس والغطاء النباتي. استخدمت الدراسة بيانات محطات جودة الهواء التابعة للهيئة الملكية، إلى جانب صور فضائية من القمر الصناعي Landsat-8، واعتمدت تقنيات نظم المعلومات الجغرافية في التحليل. تم استخدام مؤشر الغطاء النباتي NDVI لقياس الكثافة النباتية، ونموذج الارتفاعات الرقمية (DEM) لفهم التضاريس، وطريقة مقلوب المسافة الموزونة (Inverse Distance Weighted -IDW) لرسم خرائط التركز المكاني. وخلصت الدراسة بتحديد ثلاث مناطق رئيسة ذات تركز مرتفع وهي جنوب شرق الرياض، شرقها، وشمالها، وعزت هذه التركزات إلى عوامل مثل: وجود مصنع أسمنت اليمامة، انخفاض الغطاء النباتي، وتأثير العواصف الرملية. وأوضحت أن الرياح كانت العامل المناخي الأكثر تأثيراً في توزيع الجسيمات، وسُجلت أكثر من 13,000 حالة تجاوز للحدود المسموحة، معظمها في فصل الربيع نتيجة نشاط العواصف الرملية المرتفع والتقلبات الجوية.

حدود الدراسة:

تمتد مدينة الرياض فلكيًا بين دائرتي عرض 00' 19° إلى 45' 27° شمالاً، وخطى طول 00' 42° إلى " 17 48° شرقًا، وتقع جغرافيًا في وسط المملكة العربية السعودية وشبة الجزيرة العربية، ويحدها من ناحية الشمال محافظات رماح، وحريملاء، والرياض، والدرعية، ومن ناحية الجنوب محافظة الرياض، ومن الشرق محافظة الرياض، ومن الغرب محافظة حريملاء، ومن الجنوب الغربي محافظة ضرما شكل (1)، وترتفع حوالى 600 متر فوق منسوب سطح البحر، وتبلغ مساحتها 5993,1 كم2، وتعد أكبر مدن المملكة وعاصمتها السياسية، كما أنها العاصمة الإدارية لمنطقة الرياض، بسكنها ما يزيد عن خمس سكان المملكة (6,9 مليون نسمة)، تحتل مدينة الرياض حاليًا المرتبة (٤٨) بين مدن العالم من حيث حجم السكان و كانت في المرتبة (69) لعام 2013م، ومن المتوقع أن يصل حجم السكان إلى 9,5 مليون نسمة بحلول عام 2050، وبلغت كثافتها السكانية 2010,5 نسمة / كم2، ويبلغ نموها السكاني 4% خلال الفترة من 2009 وحتى 2016م، ويُعد بذلك من المعدلات المرتفعة بالمقارنة مع مدن العالم.

DOI: https://doi.org/10.33193/JALHSS.123.2025.1490
ISSN Online: 2414-3383
ISSN Print: 2616-3810
مجلة الفنون والأدب وعلوم الإنسانيات والاجتماع
Journal of Arts, Literature, Humanities and Social Sciences
www.jalhss.com
editor@jalhss.com
Volume (123) August 2025
العدد (123) أغسطس 2025



شكل (1) التقسيم الادارى ومحطات رصد ومراقبة جودة الهواء بمدينة الرياض
المصدر: (الهيئة الملكية لمدينة الرياض، (2023).

وتنقسم مدينة الرياض إداريًا إلى 21 بلدية، تنقسم كل بلدية إلى أحياء، بلغت جملتها 212 حى وتضم المدينة أكثر من 8318 منشأة صناعية بأنشطتها المختلفة، ومدينتين صناعيتين وهما المدينة الصناعية والمصفاة (مصفاة نقط أرامكو السعودية للمشتقات النفطية بأنواعها المختلفة)، (الهيئة العليا لتطوير مدينة الرياض، 2017؛ الهيئة الملكية لمدينة الرياض، 2023)، ويشهد جنوب المدينة حركة مرور كثيفة للسيارات طوال اليوم لدعم الأنشطة الصناعية بها حيث تستحوذ على ما نسبته 99,7% من إجمالى المنشأت الصناعية بالمدينة.

ـ منهج الدراسة

يتم تبنّي عدة نُهج بحثية مترابطة بهدف التنبؤ بالتوزيع المكاني - الزماني لمخاطر تلوث الجسيمات الدقيقة PM_{10}في مدينة الرياض. في المقام الأول، اتّبعت الدراسة نهجًا بحثيًا كميًا (Quantitative Research Approach)، بالاعتماد على بيانات رقمية من محطات الرصد الأرضية، والمتغيرات المناخية، وصور الاستشعار عن بعد، ومجموعات البيانات المكانية. ويمكن هذا النهج من إجراء قياسات موضوعية وتحليل إحصائي لتركز PM_{10} والعوامل المؤثرة عليها(Creswell & Creswell, 2018) ، وللتكامل مع هذا التوجه، يتم تطْبيّق أيضًا منهج تحليلي مكاني(Spatial Analytical Approach) ، يستند إلى علم النهج الجغرافى،

DOI: https://doi.org/10.33193/JALHSS.123.2025.1490
ISSN Online: 2414-3383
ISSN Print: 2616-3810
مجلة الفنون والأدب وعلوم الإنسانيات والاجتماع
Journal of Arts, Literature, Humanities and Social Sciences
www.jalhss.com
editor@jalhss.com
Volume (123) August 2025
العدد (123) أغسطس 2025

ويهدف إلى فهم الأنماط والعلاقات المكانية للظواهر عبر المساحات الجغرافية (Goodchild & Janelle, 2010). وذلك من خلال استخدام نظم المعلومات الجغرافية وطريقة الاستيفاء المكاني باستخدام أسلوب كريجينج، حيث يتم تحويل بيانات جودة الهواء المعتمدة على نقاط الرصد إلى طبقات سطحية مستمرة، وبالتالي إنتاج خرائط موسمية للمخاطر تُبرز بؤر التلوث في مختلف أنحاء مدينة الرياض.

أساليب التحليل والمعالجة:

- **تحليل كريجنج (kriging)**

تمت الاستفادة من البيانات المُنقحة في تنفيذ التحليل المكاني بهدف نمذجة التوزيع الجغرافي لتركز PM_{10} عبر مدينة الرياض. ولتحقيق ذلك، تم استخدام طريقة كريجينج (Kriging) ، إحدى تقنيات الاستيفاء الجيوإحصائي المتقدمة، عبر برنامج ArcGIS Pro 3.4 ، لإنشاء خرائط مكانية مستمرة لتركز PM_{10} تغطي كامل المدينة على المستوى الموسمي، وبدقة مكانية تصل إلى 30 × 30 مترًا لكل بكسل. وتُعد تقنية كريجينج مناسبة على وجه الخصوص لمجالات علوم البيئة، نظرًا لقدرتها على استغلال خاصية الارتباط الذاتي المكاني (Spatial Autocorrelation)، حيث تفترض أن القيم المقاسة في المواقع الجغرافية المتجاورة تكون متشابهة إلى حد كبير. وبما أن بيانات جودة الهواء غالبًا ما تُجمع من عدد محدود من محطات المراقبة، فإن استخدام كريجينج يتيح توليد سطوح مكانية مستمرة تقدّر القيم في المواقع غير المأخوذة منها عينات، اعتمادًا على القيم المتوفرة في المحطات المجاورة. ومن هذا المنطلق، فإن اختيار هذه الطريقة كان مبررًا علميًا لتمثيل التوزيع المكاني لتركز PM_{10} بدقة وموثوقية، مدعومًا بعدد من الدراسات الحديثة التي قارنت هذه الطريقة بطرق أخرى منها: مقلوب المسافة الموزونة Inverse Distance Weighted (IDW) وأقرب جار (Nearest Neighbor)، حيث خلصت دراسة Ehrampoush et al. (2017) تفوق Kriging على IDW في تمثيل التوزيع المكاني لتركز PM_{10} في مدينة يزد من خلال مؤشرات الدقة الإحصائية، مما يدل على دقتها في إعادة بناء السطح المكاني للملوثات في البيئات الحضرية. كما أوضحت دراسة Halimi et al. (2016) في مدينة طهران أن Kriging لا يقتصر على إنتاج القيم المتوقعة فحسب، بل يوفر أيضًا خرائط عدم اليقين (uncertainty) المرتبطة بالتقديرات، وهو عنصر حيوي في تقييم المخاطر البيئية واتخاذ القرار المبني على درجة الثقة في التنبؤات. وفي تايلاند، أثبتت دراسة Vorapracha et al. (2015) أن Kriging يُعد من أكثر أساليب الاستيفاء دقة في حال محدودية محطات المراقبة، خصوصًا عند اختيار نموذج مخطط شبه متغير(Semivariogram Model) مناسب. من جهة أخرى، بينت دراسة Cho & Jeong (2009) في مدينة سيول أن Kriging يوفر نتائج مكانية أكثر واقعية مقارنةً بطرق الاستيفاء التقليدية، خاصة في التقديرات الموسمية. وبناءً على ما سبق، فإن استخدام Kriging في هذه الدراسة لتقدير التركيزات الفصلية للملوث PM_{10} بمدينة الرياض يُعد منهجًا معتمدًا علميًا يعزز من دقة التمثيل المكاني، ويُسهم في تحسين مخرجات النماذج التنبؤية وتحليل المخاطر البيئية.

وبناءً عليه، تتيح البيانات المُقدّرة باستخدام كريجينج فرصًا إضافية لتعزيز النمذجة، حيث يمكن استخدامها كمدخلات أو أهداف في نماذج التعلّم الآلي(Machine Learning) ، خاصة تلك التي تدمج عوامل بيئية متعددة:درجات الحرارة، وسرعة الرياح، والرطوبة النسبية. وقد أظهرت الدراسات أن هذا النهج الهجين يُنتج نماذج أكثر قوة وواقعية، ويُمكنه التقاط التفاعلات المعقدة التي تؤثر على مستويات PM_{10} بدقة أعلى، مما يسهم في تحسين مخرجات خرائط تقييم المخاطر البيئية (Shogrkhodaei et al., 2021). وفي هذا الإطار، تم استخدام أداة Geostatistical Wizard فى بيئة برنامج ArcGIS Pro 3.4 لتطبيق تقنيات الاستيفاء المكاني Kriging، التي تأخذ بعين الاعتبار كل من البعد المكاني والمتغيرات المشتركة لتحسين دقة التقديرات. وفى السياق، يتم اختيار أحد أنواع كريجينج وهو كريجينج الاعتيادى(Ordinary Kriging - OK) ، حيث يُعد من أكثر طرق الاستيفاء الجيوحصائي شيوعًا، إذ يُوفّر أفضل مقدّر خطي غير متحيز للبيانات الموزعة مكانيًا، ويُستخدم عندما لا يُلاحظ اتجاه واضح في البيانات، وتُحسب القيمة غير المعروفة $Z^*(x_0)$ في الموقع x_0 من خلال تركيبة خطية موزونة للقيم المرصودة المحيطة $Z(x_i)$ ، كما يلي(Oliver and Webster (1990:

DOI: https://doi.org/10.33193/JALHSS.123.2025.1490
ISSN Online: 2414-3383
ISSN Print: 2616-3810
مجلة الفنون والأدب وعلوم الإنسانيات والاجتماع
Journal of Arts, Literature, Humanities and Social Sciences
www.jalhss.com
editor@jalhss.com
Volume (123) August 2025
العدد (123) أغسطس 2025

$$Z^*(x_o) = \Sigma \lambda_i Z(x_i), \text{ where } \Sigma \lambda_i = 1$$

يتم اشتقاق الأوزان λ_i من خلال حل نظام من المعادلات الخطية المبنية على نموذج مخطط شبه متغير (Semivariogram Model)، والذي يُعبّر عن الارتباط المكاني بين عينات النقاط. ويُعرّف المخطط شبه المتغير $\gamma(h)$ بالمعادلة:

$$\gamma(h) = (1 / 2N(h)) \Sigma [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

حيث:

$\gamma(h)$ قيمة المخطط شبه المتغير عند مسافة تأخر h (Lag Distance)، وتمثل مقياس التباين بين النقاط.

$N(h)$ عدد أزواج البيانات الواقعة عند تلك المسافة h

$Z(x_i)$ القيمة المرصودة عند الموقع x_i

$Z(x_i + h)$ القيمة المرصودة عند الموقع الذي يبعد مسافة h عن x_i

ويهدف كريجينج الاعتيادى إلى تقليل تباين التقدير (Estimation Variance) مع ضمان عدم التحيّز، وذلك بافتراض أن متوسط المتغير ثابت لكن غير معروف. وتُعد هذه الطريقة قوية على وجه الخصوص لأنها لا تقتصر على استيفاء القيم غير المعروفة فحسب، بل توفر أيضًا مقياسًا لعدم اليقين في التقدير يُعرف بـ تباين كريجينج(Kriging Variance) ، وبحسب (Webster & Oliver, 2007) ، فإن النمذجة الدقيقة للمخطط شبه المتغير أمر بالغ الأهمية للحصول على تنبؤات موثوقة، إذ يمكن أن تؤدي تغييرات طفيفة في معاييره إلى تأثيرات كبيرة على نتائج كريجينج. كما تُعد تقنية المخطط شبه المتغير أساسًا محوريًا في تطبيقات الاستيفاء الجيوإحصائي باستخدام كريجينج ، إذ تُستخدم لتركيب نموذج المخطط شبه المتغير النظري (النموذج الكروي أو الأسي أو الغاوسى) والذي يُستخدم لاحقًا في تقديرات كريجينج، وفى تحديد طبيعة الارتباط الذاتي المكاني (spatial autocorrelation) بين النقاط الجغرافية التي تم قياسها. ويمثل المخطط دالة إحصائية تصف كيف يتغير تباين الفرق بين القيم المرصودة مع ازدياد مسافة الفصل (lag distance) بين النقاط. وعادة ما تزداد قيمة المخطط شبه المتغير مع ازدياد المسافة، حتى تصل إلى قيمة العتبة (sill)، التي تمثل نقطة التشبع بعدها يتلاشى الارتباط المكاني، ويُعتبر المخطط حينها قد استقر عند نطاق (range) معين يعبر عن المسافة القصوى للترابط المكاني بين النقاط (Liao et al., 2006).

ويتم استخدام كل من الجذر التربيعي لمتوسط مربع الخطأ (Root Mean Square Error - RMSE)، والنسبة المئوية للجذر التربيعي لمتوسط مربع الخطأ (RMSE%) كمقياسين رئيسيين للتحقق من دقة وموثوقية نتائج الاستيفاء المكاني بطريقة كريجينج الاعتيادى، حيث يُعد RMSE مقياسًا شائعًا لتقييم الفرق بين القيم المتوقعة من النموذج والقيم الفعلية المرصودة، ويُحسب باستخدام المعادلة:

$$RMSE = \sqrt{(1/\eta \Sigma(Ei - Ai)^2)}$$

حيث Ei : يمثل القيمة المقدرة في الموقع (i) أى تم التنبؤ بها بواسطة طريقة الاستيفاء كريجينج. (Ai) يمثل القيمة الفعلية المرصودة في الموقع (i)، (η) هو العدد الإجمالي للبيانات المرصودة أو نقاط البيانات.

DOI: https://doi.org/10.33193/JALHSS.123.2025.1490
ISSN Online: 2414-3383
ISSN Print: 2616-3810
مجلة الفنون والأدب وعلوم الإنسانيات والاجتماع
Journal of Arts, Literature, Humanities and Social Sciences
www.jalhss.com
editor@jalhss.com
Volume (123) August 2025
العدد (123) أغسطس 2025

وعلى الرغم من أن RMSE يوفر مؤشرًا مباشرًا لحجم الخطأ، إلا أنه حساس للقيم الفائقة (outliers)، وقد يؤدي إلى تحريف النتائج. لذلك، يتم تطبيع RMSE للحصول على RMSE%، وهو مقياس نسبي أكثر توازنًا يُعبر عن الخطأ كنسبة مئوية من متوسط القيم المرصودة، ويُحسب كما يلي:

$$RMSE = (RMSE / \mu) \times 100\%$$

حيث (μ) يمثل متوسط القيم المرصودة.

ووفقًا لما ذكره Hengl et al. (2004)، فإن القيم المقبولة لمؤشر RMSE% في تطبيقات الاستيفاء المكاني تتراوح غالبًا بين 20% و40%، وتشير إلى دقة جيدة في التقدير. بينما تُعد القيم التي تتجاوز 70% مؤشرًا على ضعف النموذج ووجود مشكلات في البنية المكانية أو طريقة التقدير المستخدمة (Hengl et al., 2004).

وإلى جانب مؤشرات الخطأ RMSE وRMSE%، سيُستخدم تحليل الانحدار الخطي البسيط (Linear Regression) بين القيم المرصودة والمتوقعة من نموذج Kriging لتقييم دقة الاستيفاء. حيث يهدف هذا التحليل إلى تحديد مدى قوة العلاقة بين البيانات المُقاسة فعليًا والقيم الناتجة عن التنبؤ المكاني. وتُعبر معادلة خط الانحدار عن العلاقة التالية:

$$Y=a+bX$$

حيث:

Y تمثل القيم المرصودة

X القيم المتوقعة

a الجزء المقطوع (intercept) من المحور Y

b معامل الميل (slope)

إذا كانت قيمة $b \approx 1$ و$a \approx 0$ ، فهذا يشير إلى تطابق جيد بين البيانات المتوقعة والمرصودة. كما يُستخدم مخطط الانتشار (Scatter Plot) لتوضيح هذا التطابق بصريًا، حيث يُمثل كل زوج من القيم المرصودة والمتوقعة كنقطة. كلما اقتربت النقاط من الخط القطري، دل ذلك على ارتفاع جودة النموذج. بالإضافة إلى ذلك، يتم استخدام كل من معامل ارتباط بيرسون (r) ومعامل التحديد (R^2) ضمن أدوات التحقق الإحصائي من جودة نموذج كريجنيج، لقياس درجة الارتباط بين القيم المرصودة والمتوقعة. حيث يُعبر معامل الارتباط r عن قوة العلاقة الخطية بين المتغيرين، بينما يُمثلR^2 نسبة التباين في البيانات المرصودة التي يمكن تفسيرها بواسطة النموذج. ويُحسب معامل الارتباط بيرسون بالصيغة:

$$r = (n \times \sum XY - \sum X \times \sum Y) \div \sqrt{[(n \times \sum X^2 - (\sum X)^2) \times (n \times \sum Y^2 - (\sum Y)^2)]}$$

حيث:

r معامل الارتباط، n عدد القيم أو الأزواج، $\sum X$مجموع قيم المتغير X ، $\sum Y$ مجموع قيم المتغير Y ، $\sum XY$ مجموع حاصل ضرب كل زوج$(X_i \times Y_i)$ ، $\sum X^2$ مجموع مربعات قيمX ، $\sum Y^2$مجموع مربعات قيمY ، √الجذر التربيعي.

DOI: https://doi.org/10.33193/JALHSS.123.2025.1490
ISSN Online: 2414-3383
ISSN Print: 2616-3810
مجلة الفنون والأدب وعلوم الإنسانيات والاجتماع
Journal of Arts, Literature, Humanities and Social Sciences
www.jalhss.com
editor@jalhss.com
Volume (123) August 2025
العدد (123) أغسطس 2025

ويحسب معامل التحديد R^2 وفقًا للمعادلة التالية:

$$R^2 = 1 - (SS_{res} / SS_{tot})$$

حيث:

$SS_res = \sum(y_i - \hat{y}_i)^2$ مجموع مربعات البواقي (الفرق بين القيم الحقيقية والمتوقعة)

$SS_tot = \sum(y_i - \bar{y})^2$ مجموع مربعات الإجمال (الفرق بين القيم الحقيقية والمتوسط العام)

وتشير قيم R^2 القريبة من 1 إلى جودة تنبؤية عالية للنموذج، في حين تشير القيم المنخفضة إلى ضعف في تفسير التباين في القيم المرصودة. وقد أظهرت عدة دراسات تطبيقًا فعّالًا لهذا الأسلوب، حيث استخُدم في دراسة Xia et al. (2020)تحليل الانحدار لتصحيح نموذج الاستيفاء المكاني كريجينج في الصين وقياس أداء النموذج من خلال معامل التحديد R^2 الذي تجاوز 0.9 في أكثر من 95% من مواقع الرصد (Xia et al., 2020) ،كما أكدت دراسة أخرى أهمية استخدام الانحدار الخطي كوسيلة دعم لتحسين خرائط تركز PM_{10} عبر النمذجة الجغرافية (Karimi & Shokrinezhad, 2021).

يتبين مما سبق، أن تحويل بيانات محطات مراقبة الهواء المنفصلة إلى أسطح مكانية مستمرة، تُمكن المرحلة بشكل فعّال التحديات الناتجة عن التوزيع غير المتكافئ لمحطات الرصد في المناطق الحضرية الكبرى. حيث سلطت دراسات سابقة حول تلوث الهواء الضوء على الحاجة إلى أنظمة تنبؤية ديناميكية وشاملة مكانياً نظراً لتعقيد انتشار الملوثات في البيئات الحضرية (Ghaemi, Alimohammadi, & Farnaghi, 2018) ، وبالتالي، يشكّل الاستيفاء المكانى خطوة أساسية تمكن من بناء نماذج تقييم المخاطر المكانية المعتمدة على تقنيات التعلم الآلي .

النتائج:

اولا: التوزيع المكاني - الزماني لتركُّز الجسيمات العالقة الدقيقة PM_{10} :

- تُظهِر نتائج خرائط الاشتقاق المكانى بطريقة كريجنج الاعتيادى Ordinary Kriging أن مدى تركُّز الجسيمات العالقة الدقيقة PM10 يتراوح ما بين (123.14 ميكروجرام/م^3 في فصل الخريف إلى 174.94 ميكروجرام/م^3 في فصل الشتاء)، بمتوسط يبلغ 140.64 ميكروجرام/م^3 وذلك خلال الفترة الممتدة من عام 2017 – 2021م، مما يتجاوز بشكل كبير الحد السنوي الموصى به من قِبَل منظمة الصحة العالمية World Health Organization (WHO)والبالغ 20 ميكروجرام/م^3، مع التركُّز المثالي المستهدف عند 15 ميكروجرام/م^3 لحماية الصحة العامة على المدى الطويل، وفقًا للتوجيهات التي تراعي الظروف البيئية الخاصة بدول مجلس التعاون الخليجي Gulf Cooperation Council (GCC)المتأثرة بالمناخ الجاف والغبار الصحراوي (WHO, 2021)، لذلك حددت وزارة البيئة والمياه والزراعة في المملكة العربية السعودية Ministry of Environment, Water, and Agriculture (MEWA)حدًا سنويًا بـ50 ميكروجرام/م3 كحد أقصى يجب عدم تجاوزه، وهو الحد المعتمد أيضًا في دولة قطر، بينما وضعت مملكة البحرين حدًا يبلغ 80 ميكروجرام/م^3(MEWA, 2020) . ومما يثير القلق خاصّة تركُّز PM10 التي تتجاوز 209.02 ميكروجرام/م^3 في فصل الربيع، حيث تتخطى الحدود الموصى بها عالميًا بأكثر من عشر مرات، والحد المحلى بأكثر من أربع مرات، مما يعكس خطورة مستويات التلوث في مدينة الرياض.

- أما على الصعيد الفصلي، فيُعدّ فصل الربيع الأعلى تركُّزًا للجسيمات العالقة الدقيقة (PM10)، حيث يمثل 31.1% من إجمالي التركُّز لهذه الجسيمات في الفترة من 2017 إلى 2021، بمدى تركُّز يتراوح بين 140.85 و209.02 ميكروجرام/م^3. ووفقًا لبيانات التركُّز،

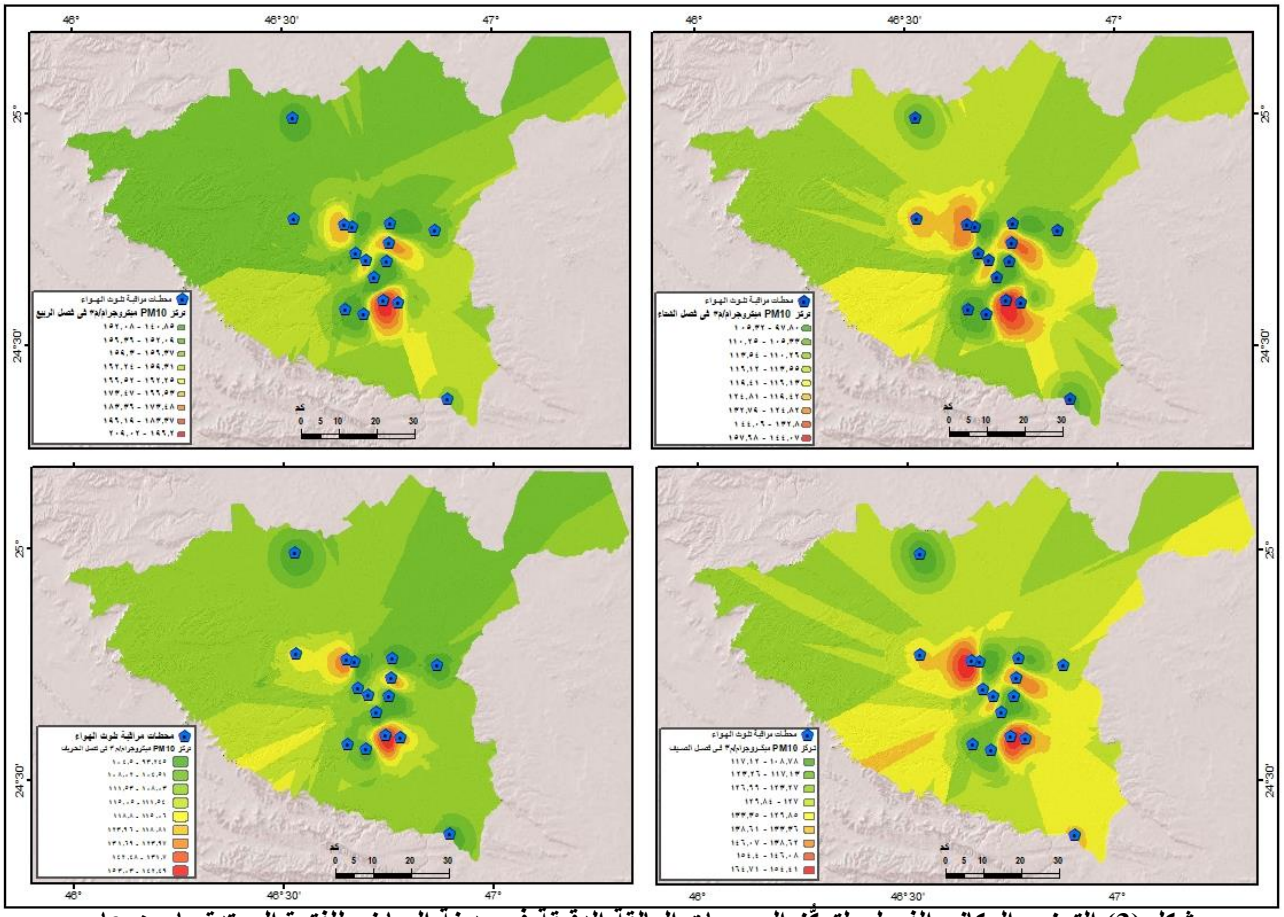
DOI: https://doi.org/10.33193/JALHSS.123.2025.1490
ISSN Online: 2414-3383
ISSN Print: 2616-3810
مجلة الفنون والأدب وعلوم الإنسانيات والاجتماع
Journal of Arts, Literature, Humanities and Social Sciences
www.jalhss.com
editor@jalhss.com
Volume (123) August 2025
العدد (123) أغسطس 2025

تظهر ثلاثة مواقع في مدينة الرياض كأعلى مناطق تركُّزًا للجسيمات العالقة الدقيقة فى كل فصول السنة، وفيما يلى التحليل المكانى لتوزيع الملوثات فى فصل الربيع الأعلى تركُّزًا فى جسيمات PM10 وذلك على النحو التالى، شكل (3):

- ـ جنوب شرق منطقة التطوير الحضرى لمدينة الرياض، يشغل تركُّز الجسيمات العالقة الدقيقة مساحة تقدر بـ 77.4 كم² (تشكل 1.3% من إجمالي مساحة مدينة الرياض)، بالإضافة إلى مساحة 28.64 كم²، بما يمثل 16.9% من مساحة أحياء (الفيصلية، اليمامة، عتيقة، منفوحة، منفوحة الجديدة، الخالدية، غبيرا، الشفا، الدار البيضاء، المناخ، المنصورة (خنشليلة)، المصانع، بدر، والمنصورية)، مع تركُّز يتراوح ما بين 166.53 و209.02 ميكروجرام/م³، وترجع هذه المستويات المرتفعة إلى عدة عوامل، منها وجود مصنع إسمنت اليمامة والمدينة الصناعية الأولى كأكبر مصادر لإنبعاثات PM10 ، حيث يُنتج مصنع الأسمنت، على وجه الخصوص، مواد جسيمية كبيرة بسبب عملياته في احتراق الوقود، وحرق الكلنكر، ونقل المواد الخام، علاوة على الصناعات الكيميائية ومواد البناء في حي المناخ، إلى جانب انتشار صناعات مواد البناء في حي العزيزية والمصانع، وأعمال البناء الخاصة بمترو الرياض، كما تسهم انبعاثات حركة المركبات الكثيفة التي تثير الغبار على الطرق والصناعات الصغيرة أيضًا في مستويات PM10 ولكنها بقدر أقل مقارنة بالمصادر الصناعية الأولية. يضاف إلى ذلك قلة الغطاء النباتي، حيث يتمركز في وادي حنيفة، وتؤدي الرياح القادمة من الجنوب والجنوب الشرقي إلى تفاقم انتشار PM10 نحو المناطق المكتظة بالسكان حيث تحمل الرياح الملوثات من المراكز الصناعية إلى المناطق السكنية القريبة مما يسهم في نقل وتثبيت الملوثات جنوب شرق الرياض (Salman et al., 2016; الزهراني، 2022).
- ـ بينما يغطي تركُّز الجسيمات العالقة PM 10 في شرق منطقة التطوير الحضرى لمدينة الرياض، مساحة تقدر بـ 33.7 كم²، ما يمثل 0.6% من إجمالى مساحة مدينة الرياض، و23 كم²، بنسبة 22.9% من إجمالي مساحة أحياء (السلام، النموذجية، المربع، الفيحاء، الروابي، الروضة، الربوة، الريان، المنار، السليمانية، الملك عبدالعزيز، الملك عبدالله، والعليا)، مع مدى تركُّز يتراوح ما بين 166.53 إلى 183.36 ميكروجرام/م³. ويرجع ذلك إلى عدة عوامل، منها كثافة حركة المركبات التي تثير الغبار على الطرق (طريق مكة المكرمة والطريق الدائرى الشرقى)، وندرة الغطاء النباتي، إضافةً إلى ذلك، تلعب سرعة واتجاه الرياح الشمالية الشرقية دورًا في نقل وتركُّز الجسيمات العالقة الدقيقة (PM10) القادمة من العروق والكثبان الرملية ومنها عرق بنيان. كما يُسهم الارتفاع التدريجي لسطح الأرض شرقي المدينة في تركُّز الجسيمات، حيث يتراوح متوسط الارتفاع بين 607 و638 مترًا عن مستوى سطح البحر (الزهراني، 2022).
- ـ وتتمثل المنطقة الثالثة فى شمالى منطقة التطوير الحضرى لمدينة الرياض حيث يشغل تركُّز الجسيمات العالقة PM 10 مساحة تقدر بـ27 كم2 (تشكل نسبة 0,5% من إجمالى مساحة مدينة الرياض، و27,02 كم2، بنسبة بلغت 34,8% من إجمالى مساحة أحياء (العقيق، المروج، الغدير، الملك فهد، الربيع، الصحافة، النخيل، جامعة الملك سعود، حطين، المحمدية). حيث قُدِّر مدى تركُّز الجسيمات العالقة الدقيقة (PM10) بـ (166.53 - 173.47ميكروجرام/م³)، ويُعزى ذلك إلى الكثافة السكانية والعمرانية والأنشطة التجارية (مشروع مترو الرياض، ومركز الملك عبدالله المالي)، علاوة على كثافة حركة مرور المركبات خاصةً (الطريق الدائرى الشمالى) التي تثير الغبار على الطرق. بينما يتراوح تركُّز الجسيمات الدقيقة العالقة (PM10) في باقي أنحاء مدينة الرياض (منطقة التطوير الحضرى وحدود حماية التنمية) ما بين 140.85 و166.52 ميكروجرام/م³. حيث تتأثر بشدة بكل من العوامل الطبيعية (العواصف الترابية وضعف التربة وتفككها، مما يسهل على الرياح حمل هذه الجزيئات. ويسهم في ذلك أيضًا سرعة الرياح واتجاهها الشمالي الشرقي مما يؤدي إلى نقل وتثبيت الجسيمات العالقة في المدينة. بالإضافة إلى ذلك، يسهم الارتفاع التدريجي للأرض، باتجاه الشمال والشمال الغربي والغرب، والذي يتراوح بين 629 و939 مترًا فوق مستوى سطح البحر، في زيادة استقرار هذه الجسيمات(Alharbi et al., 2015; الزهراني، 2022). بالإضافة إلى الأنشطة البشرية (كثافة حركة المرور اليومية والانبعاثات الصناعية وأعمال إنشاء مترو الرياض). في المقابل، تميل المناطق الغربية من مدينة

DOI: https://doi.org/10.33193/JALHSS.123.2025.1490
ISSN Online: 2414-3383
ISSN Print: 2616-3810
مجلة الفنون والأدب وعلوم الإنسانيات والاجتماع
Journal of Arts, Literature, Humanities and Social Sciences
www.jalhss.com
editor@jalhss.com
Volume (123) August 2025
العدد (123) أغسطس 2025

الرياض، ذات المناطق المفتوحة والنشاط البشري الأقل والبعيدة عن المناطق الحضرية والتركُّز الصناعي إلى تسجيل مستويات أقل من جسيمات PM10.



شكل (3) التوزيع المكانى الفصلى لتركُز الجسيمات العالقة الدقيقة فى مدينة الرياض للفترة الممتدة ما بين عام 2017 -2021م

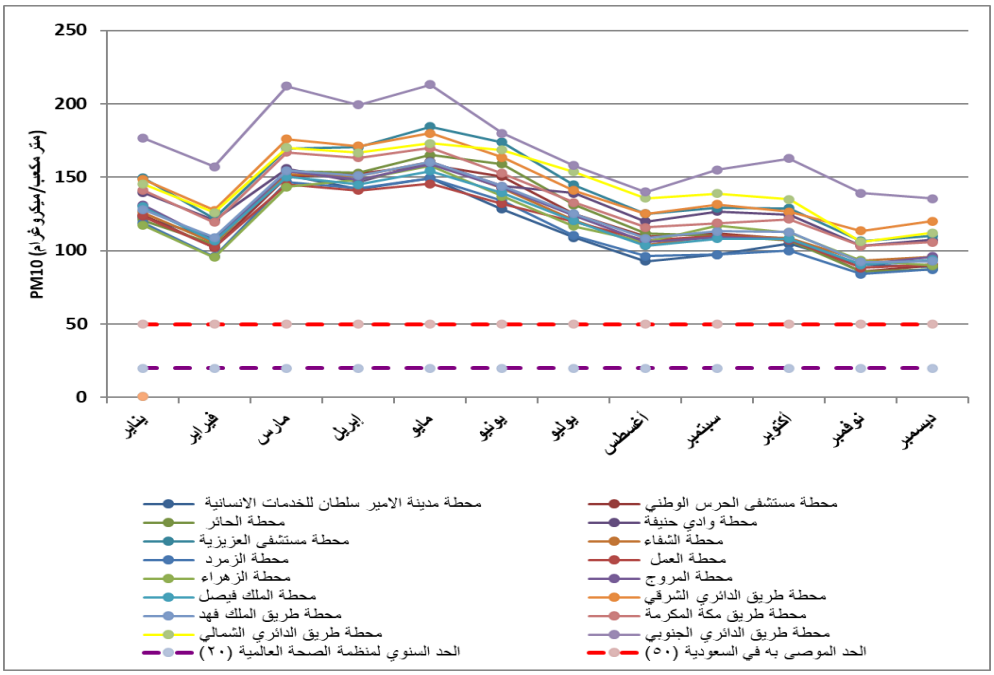
- ظلت مستويات PM10 مرتفعة في فصل الصيف، على الرغم من أنها أقل قليلاً مما كانت عليه في فصل الربيع، حيث يمثل 24.31% من إجمالي التركُز لهذه الجسيمات في الفترة من عام 2017 إلى 2021م، بمدى تركُز يتراوح بين 108,78 إلى164.71 ميكروجرام/م^3. ويتراوح مدى تركُز جسيمات PM10 المرتفعة ما بين (133,36 إلى 164,71 ميكروجرام/م^3)، وتنتشر فى جنوب شرق وشرق وشمالى منطقة التطوير الحضرى لمدينة الرياض كما هو الحال فى فصل الربيع، ويرجع السبب فى ذلك إلى إستمرار المناخ الجاف والعواصف الترابية في المساهمة في تركُز PM10، بالإضافة إلى ارتفاع درجات الحرارة وانخفاض الرطوبة في فى مدينة الرياض خلال فصل الصيف مما يؤدي إلى جفاف التربة، وزيادة احتمالية إعادة تعليق الغبار، كما تسهم زيادة توليد الطاقة لتلبية احتياجات تكييف الهواء والأنشطة الصناعية أيضًا في مستويات PM10 خلال هذا الفصل، مما يضيف التلوث من مصادر من صنع الإنسان إلى مستويات الغبار الخلفية المرتفعة بشكل طبيعي.

- تبدأ مستويات PM10 في الانخفاض خلال فصل الشتاء حيث تمثل ما نسبته 22,71% من إجمالى التركُز، بمدى تركُز يتراوح ما بين 97,8 إلى 157,56 ميكروجرام/م^3. ويتراوح مدى تركُز جسيمات PM10 المرتفعة ما بين (119,42 إلى 157,68 ميكروجرام/م^3)، وتتوزع فى جنوب شرق وشرق وشمالى منطقة التطوير

DOI: https://doi.org/10.33193/JALHSS.123.2025.1490
ISSN Online: 2414-3383
ISSN Print: 2616-3810
مجلة الفنون والأدب وعلوم الإنسانيات والاجتماع
Journal of Arts, Literature, Humanities and Social Sciences
www.jalhss.com
editor@jalhss.com
Volume (123) August 2025
العدد (123) أغسطس 2025

الحضرى لمدينة الرياض، بسبب الظروف الجوية الأكثر استقرارًا وإنخفاض درجات الحرارة وارتفاع نسبة الرطوبة وزيادة كمية هطول الأمطار، مما يساعد على منع إعادة تعليق الغبار وترسيب الجسيمات، كما تعد الانبعاثات الصناعية وحركة مرور المركبات هي المساهمين الرئيسيين في مستويات PM10، حيث يكون الغبار الطبيعي أقل انتشارًا. وقد يؤدي فصل الشتاء أحيانًا إلى انقلاب درجات الحرارة، حيث يحبس الهواء البارد الملوثات بالقرب من سطح الأرض. يمكن أن يؤدي ذلك إلى زيادة مستويات PM10 بشكل مؤقت، خاصة في المناطق الحضرية المكتظة بالسكان، على الرغم من أن تركُّز PM10 في فصل الشتاء تظل أقل مما كانت عليه في فصلى الربيع والصيف (Alharbi et al., 2015; Altuwayjiri et al., 2022).

- خلال فصل الخريف يكون تركُّز PM10 بشكل عام في أدنى مستوياتها بنسبة تصل إلى 21,89% من جملة التركُّز، وتراوح مدى تركُّز جسيمات PM 10 ما بين 93,25 إلى 153,01 ميكروجرام/م^3، ومابين (118,81 إلى 153,03 ميكروجرام/م^3) لتركُّز جسيمات PM10 المرتفعة، وتتوزع أيضًا فى جنوب شرق وشرق وشمالى منطقة التطوير الحضرى لمدينة الرياض، ويرجع ذلك إلى انخفاض وتيرة العواصف الترابية وتصبح الظروف الجوية أكثر استقرارًا. وبينما تنخفض إعادة تعليق الغبار الطبيعي، وتستمر الانبعاثات الصادرة عن حركة المرور والصناعة في المساهمة فيPM10 ، خاصة في المناطق الحضرية. وتسهم درجات الحرارة المنخفضة وارتفاع نسبة الرطوبة وهطول الأمطار على ترسب الجسيمات على سطح الأرض مما يقلل من مستويات PM10 مقارنة بفصلي الربيع والصيف.



الشكل (4) المتوسطات الشهرية لتركُّز PM 10 فى مدينة الرياض خلال الفترة الممتدة ما بين عامى 2017 -2021م

- أظهرت السلاسل الزمنية لتركُّز PM 10 فى مدينة الرياض خلال الفترة الممتدة ما بين عامى 2017 -2021م الشكل (4) أن جميع محطات الرصد تتجاوز الحدود التوجيهية لتركُّز PM10 طوال العام، حيث تراوحت قيمه

DOI: https://doi.org/10.33193/JALHSS.123.2025.1490
ISSN Online: 2414-3383
ISSN Print: 2616-3810
مجلة الفنون والأدب وعلوم الإنسانيات والاجتماع
Journal of Arts, Literature, Humanities and Social Sciences
www.jalhss.com
editor@jalhss.com
Volume (123) August 2025
العدد (123) أغسطس 2025

بين 85,9 و212,9 ميكروجرام /م3، في حين أن الحد الموصى به فى المملكة العربية السعودية 50 ميكروجرام/م3 والحد الموصى به من منظمة الصحة العالمية 20 ميكروجرام /م3، حيث سُجلت أعلى القيم في شهور فصل الربيع حيث سجل شهر مايو ومارس وإبريل 212,9 و212 و199,2 ميكروجرام / م3 لكل منهما على الترتيب فى محطة طريق الدائري الجنوبي، بينما كانت أدنى قيم سُجلت في فصل الشتاء شهر نوفمبر 85,9 ميكروجرام / م3، وشهر ديسمبر 87,5 ميكروجرام / م3 فى محطة الحائر، ومع ذلك لا تزال هذه القيم تتجاوز الحدود الآمنة الموصى بها، مما يشير إلى تفاوت مكاني واضح في التلوث. وتُعزى هذه الاختلافات إلى العوامل الموسمية مثل العواصف الرملية وقلة الأمطار، إضافة إلى العوامل البشرية مثل النشاط الصناعي وحركة المرور كما سبق ذكرها بالفصيل كما سبق.

- تبين من استخدام طريقة التحقق المتقاطع Cross validation للتحقق من صحة نتائج الاستنباط الناتجة عن استخدام طريقة كريجنج الاعتيادى Ordinary Kriging (OK) لـ 16 محطة ثابتة مراقبة تلوث الهواء بالجسيمات الدقيقة العالقة PM10 للفترة الممتدة من 2017 -2021م على مستوى فصول السنة، وذلك من خلال استخدام متوسط مربع جذر الخطأ Root Mean Squared Error (RMSE) والنسبة المئوية لمتوسط جذر الخطأ RMSE%، بالإضافة إلى استخدام معامل الارتباط بيرسون Pearson Coefficient Correlationومعادلة خط الإنحدار البسيط simple linear regression equation ومعامل التحديد (R-coefficient of determination square)، وقياسه وتمثيله بيانيًا عن طريق إنشاء مخطط التشتت أو الانتشار Scatterplots، ما يلى:

. أظهر استخدام RMSE وRMSE% موثوقية الاعتماد على طريقة كريجنج الاعتيادى فى الاستيفاء المكانى لتقدير قيم جسيمات PM10 فى المواقع التى لاتتوافر لها بيانات مرصودة وإعداد خرائط دقيقة لـ PM10 على أساس فصلى، حيث تقع RMSE% لكل فصل ضمن الحد المقبول، فقيمة RMSE% لفصل الشتاء بلغت 3,51%، وفصل الربيع 2,50%، وفصل الصيف 2,79%، وفصل الخريف5,15% مما يؤكد دقة الاستيفاء المقبولة لكل فصل فى السنة جدول (5). فوفقا لهنجل وآخرون وشكرخدائي وآخرون (Shogrkhodaei et al., 2021; Hengl et al., 2004)، تعتبر قيمة RMSE% التي تقل عن 40% مقبولة، مما يشير إلى أن الاستيفاء يمثل بدقة البيانات المرصودة، في حين تشير القيم الأعلى من 70% إلى عدم دقة في تقديرات النموذج.

جدول (5) تقييم دقة الاستيفاء بطريقة كريجنج الاعتيادى للجسيمات الدقيقة العالقة PM10 للفترة الممتدة من عام 2017 – 2021م

فصول السنة	متوسط مربع جذر الخطأ (RMSE)	النسبة المئوية لمتوسط جذر الخطأ %RMSE	الأداء	معامل ارتباط بيرسون(r)
الشتاء	4,067	3,51	مقبول	0,983
الربيع	3,263	2,50	مقبول	0,983
الصيف	4,463	2,79	مقبول	0,978
الخريف	5,713	5,15	مقبول	0,943

. تأكد من تطبيق معامل الارتباط بيرسون أن العلاقة الخطية بين القيم المرصودة والمقدرة لقيم جسيمات PM10 على مستوى فصول السنة إيجابية طردية قوية، حيث وصلت قيمة المعامل فى فصل الشتاء والربيع إلى (0,983)، وفى فصل الصيف والخريف بلغت (0,978 و 0,943) على التوالى جدول (5). مما يعني أنه مع زيادة القيم "المرصودة"، تميل القيم "المقدرة" أيضًا إلى الزيادة. فالقيم الأقرب إلى 1 تشير إلى علاقة خطية قوية، مما يؤكد دقة نموذج الانحدار في التقاط العلاقة بين القيم "المرصودة" و"المقدرة". وبالتالى يمكن الاعتماد على النموذج في اتباع اتجاه القيم "المرصودة". وأن أداءً النموذج جيدًا للتنبؤات فى مجموعة هذه البيانات.

DOI: https://doi.org/10.33193/JALHSS.123.2025.1490
ISSN Online: 2414-3383
ISSN Print: 2616-3810
مجلة الفنون والأدب وعلوم الإنسانيات والاجتماع
Journal of Arts, Literature, Humanities and Social Sciences
www.jalhss.com
editor@jalhss.com
Volume (123) August 2025
العدد (123) أغسطس 2025

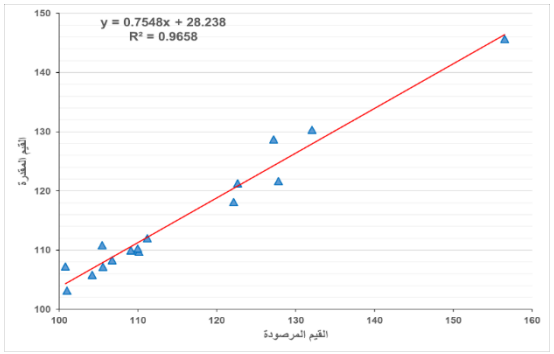
تشير قيمة معامل التحديد (R2) البالغة (0.966، 0.967، 0.957، 0.889) فى فصل الشتاء والربيع والصيف والخريف على الترتيب، أن 96,6، 96,7، 95,7، 88.9% من التباين في القيم "المقدرة" يتم تفسيره من خلال القيم "المرصودة"، حيث تشير قيمة معامل التحديد (القريبة من 1) إلى أن النموذج يلتقط اتجاه البيانات بشكل جيد، ويؤكد على قدرة النموذج على التقاط تباين كبير في القيم "المقدرة"، مع الحد الأدنى من خطأ التنبؤ للنقاط القريبة من الخط مما يدل على وجود علاقة موثوقة بين القيم المرصودة والمقدرة. ومن ثم فعالية النموذج فى إجراء التنبؤات ضمن نطاق هذه البيانات (Harris et al., 2020; Pedregosa et al., 2011). ويتم حساب خط الانحدار لتقليل أخطاء التنبؤ، مما يوضح بشكل أساسي الاتجاه المتوسط (Field, 2013)، حيث تمثل القيمة 0.755، 0.815، 0.764، 0.684 الميل فى فصول السنة، مما يشير إلى معدل التغير، أى أنه مقابل كل زيادة بمقدار وحدة واحدة في "القيم المرصودة"، تزيد "القيم المقدرة" بنحو 0.755، 0.815، 0.764، 0.684 وحدة. (يشير المنحدر أقل من 1 إلى أن القيم "المقدرة" تنمو بمعدل أبطأ مقارنة بالقيم "المرصودة")، بينما يحدد الجزء المقطوع من المحور "Y"(28.238، 24.298، 37.931، 35.599) خط الأساس للتنبؤات عندما تساوي "القيم المرصودة" صفرًا جدول (6) (Moore et al., 2012). بالإضافة إلى ذلك، يوضح مخطط التشتت أو الانتشار مع خط الانحدار الخطي بشكل بيانى العلاقة بين القيم "المرصودة" و"المقدرة"، حيث تمثل كل نقطة زوجًا من القيم "المرصودة" و"المقدرة"، مما يسمح بالتقييم السهل لتجميع البيانات وسلوك متابعة الاتجاه ويوضح انتشار هذه النقاط مدى قرب القيم "المقدرة" من اتباع اتجاه القيم "المرصودة". عندما تتجمع النقاط حول الخط المستقيم، فهذا يشير إلى وجود علاقة خطية قوية بين المتغيرات (Moore, McCabe, & Craig, 2012)، يمثل الخط الأحمر خط الانحدار الخطي الأنسب، وتُظهر النقاط القريبة من الخط الحد الأدنى من خطأ التنبؤ، مما يعني أن القيم "المقدرة" للنموذج دقيقة بالنسبة لهذه القيم "المرصودة". النقاط البعيدة عن الخط بها أخطاء تنبؤية أعلى، مما يشير إلى بعض التباين الذي لم يلتقطه النموذج شكل (5).

DOI: https://doi.org/10.33193/JALHSS.123.2025.1490
ISSN Online: 2414-3383
ISSN Print: 2616-3810
مجلة الفنون والأدب وعلوم الإنسانيات والاجتماع
Journal of Arts, Literature, Humanities and Social Sciences
www.jalhss.com
editor@jalhss.com
Volume (123) August 2025
العدد (123) أغسطس 2025

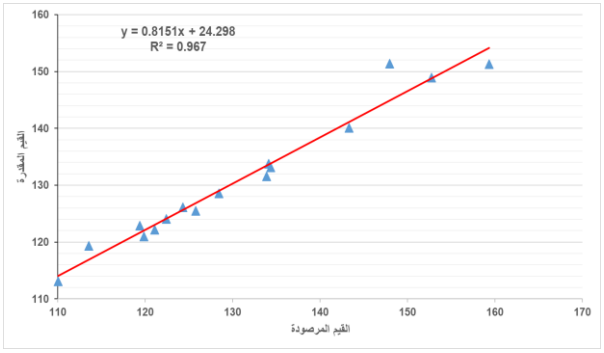
جدول (6) معادلة خط الإنحدار البسيط للجسيمات الدقيقة العالقة PM10 المرصودة والمقدرة بطريقة كريجنج الاعتيادى للفترة الممتدة من عام 2017 – 2021م

فصول السنة	الشتاء		الربيع		الصيف		الخريف	
المحطات	القيم المرصودة (X)	القيم المقدرة (Y)	القيم المرصودة (X)	القيم المقدرة (Y)	القيم المرصودة (X)	القيم المقدرة (Y)	القيم المرصودة (X)	القيم المقدرة (Y)
مدينة الامير سلطان الإنسانية	106,71	108,30	110,06	113,13	147,83	149,18	97,58	99,98
مستشفى الحرس الوطني	105,55	107,17	128,42	128,58	153,63	154,06	101,82	103,52
الحائر	104,22	105,84	134,12	133,75	157,49	158,10	101,04	102,68
وادي حنيفة	122,66	121,29	134,37	133,16	154,58	154,50	118,11	116,20
مستشفى العزيزية	127,19	128,69	147,95	151,41	174,81	176,32	121,42	127,78
الشفا	109,13	109,95	122,42	124,03	154,55	156,32	103,91	104,70
الزمرد	100,79	107,22	113,59	119,31	146,15	153,92	93,79	104,57
العمل	105,48	110,86	119,40	122,87	143,93	149,74	101,98	105,05
الزهرة	101,02	103,18	119,85	120,99	149,88	151,69	107,70	108,57
المروج	111,17	112,02	124,31	126,12	153,87	159,13	102,65	112,21
الملك فيصل	110,15	109,69	121,09	122,17	149,86	148,57	102,28	103,31
الطريق الدائري الشرقي	132,10	130,32	143,31	140,09	175,70	171,79	123,74	117,65
طريق الملك فهد	109,98	110,24	125,80	125,47	155,36	155,82	106,03	106,57
طريق مكة المكرمة	122,16	118,11	133,90	131,58	166,73	163,77	114,47	112,35
الطريق الدائري الشمالي	127,83	121,66	152,73	148,95	170,01	163,68	126,65	119,04
الطريق الدائري الجنوبي	156,52	145,63	159,31	151,30	208,07	197,12	152,40	140,26
معامل التحديد (R^2)	0.966		0.967		0.957		0,889	
Intercept (a) الجزء المقطوع من المحور Y	28.238		24.298		37.931		35.599	
Slope (b) الميل	0.755		0.815		0.764		0.684	

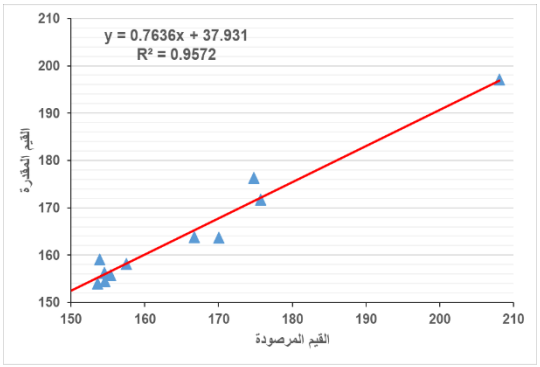
DOI: https://doi.org/10.33193/JALHSS.123.2025.1490
ISSN Online: 2414-3383
ISSN Print: 2616-3810
مجلة الفنون والأدب وعلوم الإنسانيات والاجتماع
Journal of Arts, Literature, Humanities and Social Sciences
www.jalhss.com
editor@jalhss.com
Volume (123) August 2025
العدد (123) أغسطس 2025



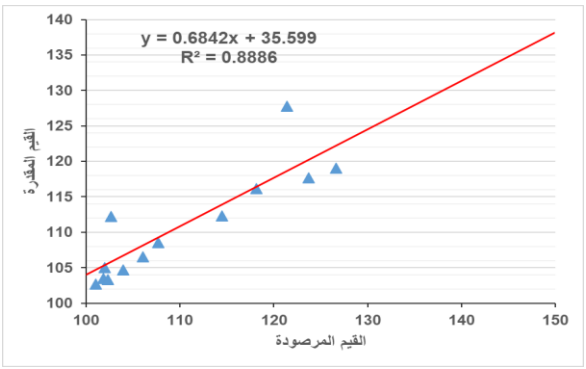
فصل الشتاء



فصل الربيع



فصل الصيف



فصل الخريف

شكل (5) مخطط الانتشار وخط الانحدار البسيط الموسمي لمتوسطات تركز PM10 خلال الفترة (2017-2021م) فى مدينة الرياض

خلاصة النتائج (الاستنتاجات)

وكشفت نتائج الدراسة عدد من الرؤى المهمة، يمكن إبرازها على النحو التالي:

- تبين من خلال تحليل توزيع توزيع الجسيمات الدقيقة العالقة فى الهواء PM_{10} فى مدينة الرياض بين عامي 2017 و2021 باستخدام طريقة الاشتقاق المكانى كريجينغ الاعتيادى للبيانات المقاسة أن مستويات تركز PM_{10} على المستوى السنوى تراوحت بين بين 123.14 ميكروغرام/م^3 في فصل الخريف و174.94 ميكروغرام/م^3 في فصل الشتاء، بمتوسط قدره 140.64 ميكروغرام/م^3، مما يتجاوز الحد السنوي الذي تحدده منظمة الصحة العالمية (20 ميكروغرام/م^3)، ومن الملاحظ أن تركزات PM_{10} خلال فصل الربيع كانت الأعلى، حيث تجاوزت 209.02 ميكروغرام/م^3، وهو ما يفوق بكثير الحدود العالمية والمحلية. أما على المستوى الفصلى، فقد شهد فصل الربيع أعلى تركز PM_{10} حيث مثل 31.1% من إجمالي التركيز السنوي، وتراوحت القيم خلاله ما بين 140.85 و209.02 ميكروغرام/م^3. ومكانيًا كان تركز PM_{10} أعلى خلال الفصل في مناطق جنوب شرق وشرق وشمال الرياض كما هو الحال فى باقى فصول السنة، متأثرة بعوامل الانبعاثات الصناعية، وحركة المرور، وسرعة الرياح واتجاهها والعواصف الترابية. أما فى فصل الصيف، فعلى الرغم من أن كانت مستويات PM_{10} أقل قليلاً مقارنةً بفصل الربيع ولكنها ظلت مرتفعة، حيث تراوحت بين 108.78

DOI: https://doi.org/10.33193/JALHSS.123.2025.1490
ISSN Online: 2414-3383
ISSN Print: 2616-3810
مجلة الفنون والأدب وعلوم الإنسانيات والاجتماع
Journal of Arts, Literature, Humanities and Social Sciences
www.jalhss.com
editor@jalhss.com
Volume (123) August 2025
العدد (123) أغسطس 2025

و164.71 ميكروغرام/م³، ونتجت عن العواصف الترابية ودرجات الحرارة العالية. بينما شهد فصل الشتاء أدنى مستويات تركز PM_{10} (من 97.8 إلى 157.56 ميكروغرام/م³)، ويرجع ذلك على الأرجح إلى درجات الحرارة المنخفضة والرطوبة العالية التي تساعد على تقليل إعادة تعليق الغبار. كما كان أيضاً فصل الخريف أقل نسبيًا فى تركز PM_{10}، حيث تراوحت بين 93.25 و153.01 ميكروغرام/م³. وبشكل عام، توزعت أعلى تركزات في مناطق التطوير الحضري جنوب شرق الرياض، بما في ذلك أحياء مثل الفيصليّة ومنفوحة، بسبب القرب من المصادر الصناعية حيث مصانع الأسمنت والأنشطة الإنشائية. كما أظهرت المناطق الشرقية والشمالية بالمدينة أيضًا مستويات مرتفعة، تأثرت بحركة المرور والانبعاثات الصناعية، فضلاً عن الخصائص الجغرافية كإرتفاع مستوى سطح الأرض، وفى المقابل المناطق الغربية من مدينة الرياض، التي تشهد نشاطًا صناعيًا أقل ومساحات مفتوحة أكبر، عرضت تركزاتPM_{10} أقل.

- استخدمت الدراسة طرق التحقق المتقاطع وتمثلت فى النسبة المئوية لمتوسط جذر الخطأ RMSE% ، معامل الارتباط بيرسون، ومعامل التحديد (R-square) للتحقق من دقة النموذج المكاني كريجينغ الاعتيادى، أظهرت النتائج أن النموذج قد تنبأ بدقة تركزات PM_{10}، حيث كانت قيم RMSE% منخفضة (من 2.5% إلى 5.15%)، وكان معامل الارتباط بيرسون مرتفعًا (أعلى من 0.94 لجميع الفصول). وتراوحت قيم معامل التحديد R^2 من 0.89 إلى 0.97، مما يشير إلى قدرة قوية للنموذج في التنبؤ بمستويات PM_{10} مع هامش خطأ ضئيل، بالإضافة إلى ذلك أظهر التحليل الانحدار الخطى البسيط علاقة خطية إيجابية بين تركيزات PM_{10} الملاحظة والمقدرة، مع قيم انحدار تشير إلى معدل زيادة القيم المقدرة مقارنة بالقيم الملاحظة (المقاسة). وبالتالى، يمكن الاعتماد على هذا النموذج في التنبؤ بمستويات PM_{10} عبر الفصول المختلفة والمواقع داخل الرياض.

وبناءً عليه، تؤكد الدراسة على مستويات التلوث العالية لجسيمات PM_{10} في الرياض، وخاصة في فصل الربيع، الناتجة عن الأنشطة الصناعية وحركة المرور والعواصف الترابية. وتبرز النتائج الحاجة إلى تدابير صارمة لمراقبة جودة الهواء لحماية صحة العامة.

التوصيات:

استنادًا إلى نتائج الدراسة، هناك العديد من المجالات الواعدة التي يمكن أن تساهم في تعزيز فهم تلوثPM_{10} وتأثيراته على البيئات الحضرية. هذه المجالات موضحة أدناه، وذلك على النحو التالى:

1- تكامل البيانات في الوقت الفعليIntegration of Real-Time Data : بينما استخدمت الدراسة البيانات التاريخية لتطوير النماذج، يمكن أن يُسهم دمج البيانات في الوقت الفعلي من أجهزة استشعار جودة الهواء، وأنظمة مراقبة حركة المرور، ومحطات الطقس بشكل كبير في تعزيز دقة وتوقيت التنبؤات بـPM_{10} سيسمح الرصد في الوقت الفعلي بتقييمات مخاطر ديناميكية وتحذيرات صحية عامة في الوقت المناسب، مما يحسن استجابة أنظمة إدارة جودة الهواء.

3- التوسع فى دراسة ملوثات أخرى: بينما ركزت الدراسة علىPM_{10} ، فإن ملوثات أخرى منها: $PM_{2.5}$ ، وأكاسيد النيتروجين(NOx) ، وأكاسيد الكبريت (SOx) تعد أيضًا ذات أهمية كبيرة لجودة الهواء والصحة العامة. يمكن أن يمتد البحث المستقبلي إلى دمج نهج النمذجة المكانية الزمنية لتشمل هذه الملوثات، مما يتيح تقييمًا أكثر شمولًا لمخاطر جودة الهواء واستراتيجيات التخفيف المستهدفة بشكل أفضل لتلوث الهواء الحضري.

4- دمج العوامل الاجتماعية والسلوكية: يمكن للبحوث المستقبلية استكشاف العوامل الاجتماعية والسلوكية التي تسهم في التعرض لـPM_{10} والمخاطر في السكان الحضريين. على سبيل المثال، قد تختلف نتائج الصحة المتعلقة بالتعرض لـPM_{10} بين الأحياء بناءً على عوامل مثل مستويات الدخل، والوصول إلى الرعاية الصحية، والوعي العام بمخاطر تلوث الهواء. يمكن أن يعزز دمج هذه المتغيرات من دقة خرائط المخاطر ويضمن أن تكون جهود التخفيف عادلة وشاملة .

5- الدراسات الطولية حول التأثيرات الصحية: بينما تركز هذه الدراسة على نمذجة التوزيع المكانية الزمنية لـ PM_{10}، يمكن للبحوث المستقبلية ربط بيانات التلوث بنتائج الصحة من خلال إجراء دراسات طولية. يمكن أن

DOI: https://doi.org/10.33193/JALHSS.123.2025.1490
ISSN Online: 2414-3383
ISSN Print: 2616-3810
مجلة الفنون والأدب وعلوم الإنسانيات والاجتماع
Journal of Arts, Literature, Humanities and Social Sciences
www.jalhss.com
editor@jalhss.com
Volume (123) August 2025
العدد (123) أغسطس 2025

تبحث هذه الدراسات في التأثيرات الصحية المباشرة للتعرض لـPM_{10} ، بما في ذلك معدلات الأمراض التنفسية والأمراض القلبية والوفاة، مما يساعد على قياس عبء الصحة العامة الناجم عن تلوث الهواء في البيئات الحضرية.

6- تطوير أنظمة دعم القرار التفاعلية: يمكن للبحوث المستقبلية التركيز على إنشاء أنظمة دعم القرار التفاعلية لمخططي المدن وصانعي السياسات. يمكن أن تدمج هذه الأنظمة بيانات جودة الهواء في الوقت الفعلي، والنماذج المعتمدة على التعلم الآلي، وخرائط المخاطر المرئية لدعم اتخاذ القرارات المستندة إلى البيانات. يمكن أن تساعد هذه الأنظمة في التخطيط لتدابير مكافحة التلوث، وتصميم المساحات الخضراء، واتخاذ قرارات التنظيم الحضري التي تقلل من التعرض للملوثات الضارة.

7- تقييم استراتيجيات التخفيف من التلوث: يمكن أيضًا أن تركز الدراسات المستقبلية على تقييم فعالية استراتيجيات التخفيف من التلوث المختلفة، بما فى ذلك إدارة حركة المرور، وتنظيمات الصناعة، وتطوير البنية التحتية الخضراء. يمكن أن تركز الأبحاث على مقارنة المناطق ذات مستويات التدخل المختلفة لتقييم مدى نجاح استراتيجيات متنوعة في تقليل تركزات PM_{10} وتحسين جودة الهواء في المناطق الحضرية.

8- استخدام علوم المواطنCitizen Science : من خلال دمج مبادرات علوم المواطن في مراقبة جودة الهواء، يمكن جمع بيانات قيمة وزيادة مشاركة الجمهور في قضايا جودة الهواء. يمكن للبحوث المستقبلية استكشاف استخدام أجهزة استشعار هواء منخفضة التكلفة موزعة عبر المدن لتوليد بيانات جودة الهواء المعتمدة على المشاركة الجماعية، التي يمكن دمجها مع نماذج التعلم الآلي للتنبؤات المحلية والشخصية.

وبناءً عليه، من خلال توسيع هذه المجالات البحثية، يمكن للدراسات المستقبلية تحسين النماذج التنبؤية، وتطوير استراتيجيات أكثر فعالية لإدارة جودة الهواء، وتحسين نتائج الصحة العامة في المناطق الحضرية. ستكون هذه الجهود حاسمة في مواجهة تحدي تلوث الهواء الحضري المتزايد وتأثيراته على المجتمعات في جميع أنحاء العالم.

المراجع

1. Zhang, L., Li, X., Zheng, D., Zhang, K., Ma, Q., Zhao, Y., & Ge, Y. (2021a). Merging multiple satellite-based precipitation products and gauge observations using a novel double machine learning approach. Journal of Hydrology, 594, 125969. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.125969
2. World Health Organization. (2021b). WHO global air quality guidelines: Particulate matter ($PM_{2.5}$ and PM_{10}), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228
3. Orellano, P., Kasdagli, M. I., Pérez Velasco, R., & Samoli, E. (2024). Long-Term Exposure to Particulate Matter and Mortality: An Update of the WHO Global Air Quality Guidelines Systematic Review and Meta-Analysis. International journal of public health, 69, 1607683. https://doi.org/10.3389/ijph.2024.1607683
4. Barrett J. R. (2015). "Exported" deaths and short-term PM10 exposure: factoring the impact of commuting into mortality estimates. Environmental health perspectives, 123(1), A22. https://doi.org/10.1289/ehp.123-A22
5. Alharbi, H. A., Rushdi, A., Bazeyad, A. Y., & Al-Mutlaq, K. (2024). Temporal variations, air quality, heavy metal concentrations, and environmental and health impacts of atmospheric PM2.5 and PM10 in Riyadh City, Saudi Arabia. Atmosphere, 15(12), 1448. https://doi.org/10.3390/atmos15121448

DOI: https://doi.org/10.33193/JALHSS.123.2025.1490
ISSN Online: 2414-3383
ISSN Print: 2616-3810
مجلة الفنون والأدب وعلوم الإنسانيات والاجتماع
Journal of Arts, Literature, Humanities and Social Sciences
www.jalhss.com
editor@jalhss.com
Volume (123) August 2025
العدد (123) أغسطس 2025

6. Modaihsh, A. , Al-Barakah, F. , Nadeem, M. and Mahjoub, M. (2015) Spatial and Temporal Variations of the Particulate Matter in Riyadh City, Saudi Arabia. Journal of Environmental Protection, 6, 1293-1307. doi: 10.4236/jep.2015.611113.
7. Al-Zboon, K., Matalqah, W., & Ammary, B. (2021). Effect of cement industry on ambient air quality and potential health risk: A case study from Riyadh, Saudi Arabia. Jordanian Journal of Engineering and Chemical Industries, 4(1), 14–23. https://doi.org/10.48103/jjeci422021
8. Yasin, K. H., Yasin, M. I., Iguala, A. D., Gelete, T. B., Tulu, D., & Kebede, E. (2025). Predictive machine learning and geospatial modeling reveal PM10 hotspots and guide targeted air pollution interventions in Addis Ababa, Ethiopia. Discover Applied Sciences, 7(263). https://doi.org/10.1007/s42452-025-06723-w
9. Almaliki, A., & Khattak, A. (2024). Synergizing TabNet and SHAP for PM10 forecasting: Insights from Makkah, Saudi Arabia. IEEE Access, 12, 195528–195543. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3520815
10. Altuwayjiri, A., Pirhadi, M., Kalafy, M., Alharbi, B. H., & Sioutas, C. (2021). Impact of different sources on the oxidative potential of ambient particulate matter PM10 in Riyadh, Saudi Arabia: A focus on dust emissions. The Science of the Total Environment, 150590. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150590
11. Salman, A., Al-Tayib, M., Hag-Elsafi, S., & Al-Duwarij, N. (2016). Assessment of pollution sources in the southeastern of Riyadh and its impact on the population/Saudi Arabia. Arabian Journal of Geosciences, 9, 1–16. https://doi.org/10.1007/s12517-016-2371-4
12. Bian, Q., Alharbi, B. H., Shareef, M. M., Husain, T., Pasha, M., Atwood, S., & Kreidenweis, S. (2017). Sources of $PM_{2.5}$ carbonaceous aerosol in Riyadh, Saudi Arabia. Atmospheric Chemistry and Physics, 18, 3969–3985. https://doi.org/10.5194/ACP-18-3969-2018
13. Shogrkhodaei, S. Z., Razavi-Termeh, S. V., & Fathnia, A. (2021). Spatio-temporal modeling of PM2.5 risk mapping using three machine learning algorithms. Environmental Pollution, 289, 117859. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117859
14. Rojas-Rueda, D., Alsufyani, W., Herbst, C., AlBalawi, S., Alsukait, R., & Alomran, M. (2021). Ambient particulate matter burden of disease in the Kingdom of Saudi Arabia. Environmental Research, 111036. https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111036
15. Brook, R. D., Rajagopalan, S., Pope, C. A., et al. (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
16. Pope, C. A., & Dockery, D. W. (2006). Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect. Journal of the Air & Waste Management Association, 56(6), 709–742. https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485
17. Cressie, N., & Wikle, C. K. (2011). Statistics for spatio-temporal data. John Wiley & Sons.

DOI: https://doi.org/10.33193/JALHSS.123.2025.1490
ISSN Online: 2414-3383
ISSN Print: 2616-3810
مجلة الفنون والأدب وعلوم الإنسانيات والاجتماع
Journal of Arts, Literature, Humanities and Social Sciences
www.jalhss.com
editor@jalhss.com
Volume (123) August 2025
العدد (123) أغسطس 2025

18. Li, S., Dragicevic, S., & Veenendaal, B. (2021). GeoAI: Applications and emerging trends. International Journal of Geographical Information Science, 35(3), 365–384. https://doi.org/10.1080/13658816.2020.1797490
19. Rybarczyk, Y., & Zalakeviciute, R. (2018). Machine learning approaches for outdoor air quality modelling: A systematic review. Applied Sciences, 8(12), 2570. https://doi.org/10.3390/app8122570

20. Shogrkhodaei, S. Z., Razavi-Termeh, S. V., & Fathnia, A. (2021). Spatio-temporal modeling of PM2.5 risk mapping using three machine learning algorithms. Environmental Pollution, 289, 117859. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117859
21. Ghaemi, Z., Alimohammadi, A., & Farnaghi, M. (2018). LaSVM-based big data learning system for dynamic prediction of air pollution in Tehran. Environmental Monitoring and Assessment, 190, 300. https://doi.org/10.1007/s10661-018-6659-6
22. Haghbayan, S., & Tashayo, B. (2021). Integrating ground-based air quality monitoring stations with mobile sensor units to improve the accuracy of PM2.5 concentration modeling. Sepehr. https://doi.org/10.22131/sepehr.2021.242859
23. Christakis, I., Stavrakas, I., Hloupis, G., & Tsakiridis, O. (2020, September). Low cost sensor implementation and evaluation for measuring NO_2 and O_3 pollutants. In 2020 9th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCAST) (pp. 1–4). IEEE. https://doi.org/10.1109/MOCAST49295.2020.9200245
24. Sudhira, H. S., Ramachandra, T. V., & Jagadish, K. S. (2003). Urban sprawl pattern recognition and modeling using GIS. map India, 2003, 28-31.
25. Mozumder, C., Reddy, K. V., & Pratap, D. (2013). Air pollution modeling from remotely sensed data using regression techniques. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 41(2), 269–277. https://doi.org/10.1007/s12524-012-0235-2
26. Sohrabinia, M., & Khorshiddoust, A. M. (2007). Application of satellite data and GIS in studying air pollutants in Tehran. Habitat International, 31(2), 268–275. https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2007.02.003
27. Wijeratne, I. K., & Bijker, W. (2006). Mapping dispersion of urban air pollution with remote sensing. In ISPRS Vienna 2006 Symposium (pp. 125–130). International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS).
28. Zoran, M. A., & Zoran, L. F. V. (2005). Mapping of dispersion of urban air pollution using remote sensing and in-situ monitoring data. Proceedings of SPIE, 5979, Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere X, 597914. https://doi.org/10.1117/12.627775
29. Goheer, M. A., Hassan, S. S., Sheikh, A. S., Malik, Y., Uzair, M., & Satti, T. N. (2025). Assessing smog trends and sources of air pollutants across northeastern districts of Punjab, Pakistan using geospatial techniques. International Journal of Environmental Science and Technology, 22, 3657–3674. https://doi.org/10.1007/s13762-024-05236-9
30. Nguyen, X. T., Le, T. T., Nguyen, K. H., Nguyen, T. T. T., & Luu, T. P. K. (2025). Assessing air pollution and seasonal variations in Dong Nai Province, Vietnam: A geospatial analysis of key air quality parameters (2022−2023). Urban Climate, 45, 102475. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2025.102475

DOI: https://doi.org/10.33193/JALHSS.123.2025.1490
ISSN Online: 2414-3383
ISSN Print: 2616-3810
مجلة الفنون والأدب وعلوم الإنسانيات والاجتماع
Journal of Arts, Literature, Humanities and Social Sciences
www.jalhss.com
editor@jalhss.com
Volume (123) August 2025
العدد (123) أغسطس 2025

31. Tikader, M., Mukhopadhyay, D., & Islam, M. Z. (2023). Role of Remote Sensing and GIS in mitigating Particulate Matters that intensify Air pollution in India: A Review. Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences, 12(10), 402–418.
32. Tikader, M., Mukhopadhyay, D., & Dabhadker, K. (2024). Remote sensing and GIS in air pollution mitigation: A bibliometric review of Chhattisgarh, India. International Journal of Environment and Climate Change. https://doi.org/10.9734/ijecc/2024/v14i44106
33. Munir, S., Gabr, S. S., Habeebullah, T. M., & Janajrah, M. A. (2016). Spatiotemporal analysis of fine particulate matter ($PM_{2.5}$) in Saudi Arabia using remote sensing data. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 19(2), 195–205. https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.06.001
34. Ehrampoush, M., Jamshidi, S., Sakhvidi, M. Z., & Miri, M. (2017). A comparison on function of kriging and inverse distance weighting models in PM10 zoning in urban area. Journal of Environmental Health and Sustainable Development, 2(2), 379–387.
35. Oliver, M. A., & Webster, R. (1990). Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. International Journal of Geographical Information Systems, 4(3), 313–332. https://doi.org/10.1080/02693799008941549
36. Webster, R., & Oliver, M. A. (2007). Geostatistics for environmental scientists (2nd ed.). Wiley. https://doi.org/10.1002/9780470517277
37. Liao, D., Peuquet, D., Duan, Y., Whitsel, E., Dou, J., Smith, R. L., Lin, H., Chen, J., & Heiss, G. (2006). GIS approaches for the estimation of residential-level ambient PM concentrations. Environmental Health Perspectives, 114(9), 1374–1380. https://doi.org/10.1289/ehp.9169
Hengl, T., Heuvelink, G. B. M., & Stein, A. (2004). A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. Geoderma, 120(1–2), 75–93. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.08.018
38. Karimi, B., & Shokrinezhad, B. (2021). Spatial variation of ambient PM2.5 and PM10 in the industrial city of Arak, Iran: A land-use regression. Atmospheric Pollution Research. https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101235
Ghaemi, Z., Alimohammadi, A., & Farnaghi, M. (2018). LaSVM-based big data learning system for dynamic prediction of air pollution in Tehran. Environmental Monitoring and Assessment, 190, 300. https://doi.org/10.1007/s10661-018-6659-6
39. Ministry of Environment, Water, and Agriculture. (2020). Executive regulations for air quality. Retrieved from https://www.mewa.gov.sa/ar/InformationCenter/DocsCenter/RulesLibrary/Pages/default.aspx.
40. Farahani, V. J., Altuwayjiri, A., Pirhadi, M., Verma, V., Ruprecht, A., Diapouli, E., Eleftheriadis, K., & Sioutas, C. (2022). The oxidative potential of particulate matter (PM) in different regions around the world and its relation to air pollution sources. Environmental Science, 2(5), 1076–1086. https://doi.org/10.1039/d2ea00043a
41. Alharbi, B., Shareef, M. M., & Husain, T. (2015). Study of chemical characteristics of particulate matter concentrations in Riyadh, Saudi Arabia. Arabian

DOI: https://doi.org/10.33193/JALHSS.123.2025.1490
ISSN Online: 2414-3383
ISSN Print: 2616-3810
مجلة الفنون والأدب وعلوم الإنسانيات والاجتماع
Journal of Arts, Literature, Humanities and Social Sciences
www.jalhss.com
editor@jalhss.com
Volume (123) August 2025
العدد (123) أغسطس 2025

Journal for Science and Engineering, 40(10), 2851–2863. https://doi.org/10.5094/APR.2015.011

42. Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., et al. (2020). Array programming with NumPy. Nature, 585, 357–362. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2.

43. Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., et al. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. Journal of Machine Learning Research, 12, 2825–2830.

44. Moore, D. S., McCabe, G. P., & Craig, B. A. (2012). Introduction to the practice of statistics (7th ed.). W.H. Freeman.

45. الزهراني، س. س. م. (2022). التوزيع المكاني لتركُّز الجسيمات العالقة الدقيقة (PM10) و (PM2.5) وعلاقتهما بعناصر المناخ، وحدود تركُّزهما بمدينة الرياض .مجلة جامعة الجوف للعلوم الإنسانية، 13-210 , 243.مسترجع من http://search.mandumah.com/Record/1279910.