



تحليل الأنماط السائدة للهباء الجوي وتغيراتها المشترك مع الرياح في منطقة الباحة - المملكة العربية السعودية- ضمن إطار إحصائي مكاني

علي بن سعيد الغامدي⁽¹⁾

ملخص

الأهداف: في ظل وجود تباينات في أنماط الهباء الجوي بين مناطق المملكة العربية السعودية، وغياب دراسات تفصيلية مستقلة للخصائص المكانية للهباء الجوي في منطقة الباحة، جاءت هذه الدراسة لسلّح هذه الفجوة؛ لِمَا تمازُ به المنطقة من تنوع في بيئاتها الطبيعية، وكونها من أبرز المقاصد السياحية الصيفية، فضلاً عن وقوعها ضمن نطاق جغرافي يتسم بخصائص جغرافية تعمل على إحداث تباينات محلية في أنماط الهباء الجوي. هدفت الدراسة إلى كشف السمات المكانية والزمانية السائدة للهباء الجوي وتحليلها، إضافةً إلى تقييم دور الرياح السطحية (سرعة واتجاهاً). المنهج: اعتماداً على بيانات العمق البصري للهباء الجوي، إضافةً إلى بيانات الرياح السطحية (2000-2024)، وظُفَت الدراسة إطاراً إحصائياً مكانياً اشتمل على تحليل المركبات الأساسية لاستخلاص الأنماط المكانية السائدة وتتبع سلوكها الزمني، وتحليل التغيرات الأقصى لتحليل التغيرات المشترك بين الهباء والرياح، عبر تهيئة تحليليتين تُمكنان من مقارنة دور سرعة الرياح ودور اتجاه الرياح ضمن سياق مكاني. النتائج: كشفت النتائج عن ثلاثة أنماط سائدة للهباء في منطقة الباحة، تتمركز على الأجزاء الشرقية والغربية والوسطى من المنطقة؛ حيث ينشط الهباء في فصل الربيع وفصل الصيف وشهر يوليو في هذه الأجزاء على التوالي. هذا التوزيع يتسق مع الخصائص الطبوغرافية للمنطقة؛ ممّا يشير إلى دور التضاريس في أنماط الهباء الجوي. كما توافقت الأنماط السائدة للهباء مع النمط الموسمي للرياح، مع وضوح لدور بارز لاتجاه الرياح في تفسير أنماط الهباء مقارنة بسرعة الرياح، مع أهمية للتباين اليومي في خصائص الرياح. الخاتمة: يمكن البناء على نتائج الدراسة لتعزيز أعمال التخطيط الصحي والبيئي الاستباقي على مستوى المنطقة، مع إمكانية مواءمة المنهجية للتطبيق في مناطق أخرى في المملكة.

الكلمات المفتاحية: الهباء الجوي، الباحة، الرياح، الإحصاء المكاني

تُسَلَّم البحث في: 2026/1/28

أُجيز للنشر في: 2026/4/20

الغامدي، علي بن سعيد. (2026). تحليل الأنماط السائدة للهباء الجوي وتغيراتها المشتركة مع الرياح في منطقة الباحة - المملكة العربية السعودية- ضمن إطار إحصائي مكاني. مجلة دراسات الخليج والجزيرة العربية، 52(201)، 145-176.

<https://doi.org/10.34120/jgaps.v52i201.3901>



هذه الدراسة ذات وصول مفتوح نشرت بموجب رخصة المشاع الإبداعي - (CC BY-NC 4.0).

(1) أستاذ مشارك، قسم الجغرافيا، كلية العلوم الإنسانية والاجتماعية، جامعة الملك سعود.

arorifi@ksu.edu.sa

An analysis of dominant aerosol patterns and their covariance with wind in Al-Baha Province, Kingdom of Saudi Arabia, using a geospatial statistical framework

Ali S. Alghamdi⁽¹⁾

Abstract

Objectives: While aerosol patterns vary significantly across the Kingdom of Saudi Arabia, the spatial characteristics of aerosols in the Al-Baha Province remain poorly understood. This is further reinforced by the province's diverse natural environments, its importance as a major summer tourism destination, and its location within a geographical setting that stimulates localized variability in aerosol distribution. The study aims to address this gap by identifying the dominant spatio-temporal patterns of aerosols and evaluating the role of surface wind (speed and direction). **Method:** Using aerosol optical depth data and surface wind data collected between 2000 and 2024, the study adopted a geospatial statistical framework that incorporates principal component analysis to extract dominant spatial patterns and their temporal evolution, and maximum covariance analysis to investigate the coupled variability between aerosols and wind. The study employed two analytical configurations to assess the roles of wind speed and wind direction within a spatial context. **Results:** Three dominant aerosol patterns were detected correspond to the eastern, western, and central parts of the study area, with peak aerosol activity occurring in spring, summer, and July, respectively. These patterns closely reflect the region's topography, highlighting the role of terrain in shaping aerosol patterns. Aerosol patterns were highly aligned with the seasonal wind climatology, and wind direction played a greater role than wind speed, in addition to the notable role of diurnal variability in wind characteristics. **Conclusion:** These findings contribute to proactive environmental and public health planning, and the employed framework can be adapted for other regions in the Kingdom.

Keywords: aerosol, Al-Baha, wind, geospatial analysis

Submitted: 28/1/2026

Accepted: 20/4/2026

Alghamdi, A. S. (2026). An analysis of dominant aerosol patterns and their covariance with wind in Al-Baha Province, Kingdom of Saudi Arabia, using a geospatial statistical framework. *Journal of the Gulf and Arabian Peninsula Studies*, 52(201), 145–176.

<https://doi.org/10.34120/jgaps.v52i201.3901>



This article is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution license (CC BY-NC 4.0).

(1) Associate Professor, Department of Geography, College of Humanities and Social Sciences, King Saud University. aorifi@ksu.edu.sa

المقدمة

يؤدي الهباء الجوي (Aerosols) -جسيمات دقيقة صلبة أو سائلة معلقة في الغلاف الجوي- دوراً رئيساً في تنظيم المناخ على المستويين الإقليمي والمحلي، من خلال التأثير في التوازن الإشعاعي للغلاف الجوي وفي عمليات الهطول، إلى جانب انعكاساته السلبية على البيئة وجودة الهواء وصحة الإنسان، لا سيما في البيئات الجافة وشبه الجافة (Notaro et al., 2013; Parajuli et al., 2022). تحتل المملكة العربية السعودية موقعاً جغرافياً فريداً يجعلها ضمن نطاق يتأثر بمصادر انبعاثات غبارية رئيسة، بما في ذلك صحراء الربع الخالي وصحراء النفود، إلى جانب امتداد تأثير مصادر الغبار القادمة من الصحراء الكبرى ومنطقة الساحل الإفريقي. كما تخضع المملكة لتأثيرات عددٍ من الأنماط الجوية والكتل الهوائية المتباعدة، فضلاً عن الدور البارز للتضاريس الجبلية في جنوبها الغربي. يُؤدّي تفاعل هذه العوامل مجتمعةً إلى تشكيل أنماط ديناميكية للهباء الجوي تتسم بدرجة عالية من التباين المكاني والزمني على مستوى المملكة.

تشير دراسات عديدة على سبيل المثال، (Ali et al., 2017; Banks et al., 2017) إلى أن معدلات الغبار وأحمال الهباء (Aerosol Loading) -الذي عادة ما يُقاس بمؤشر العمق البصري للهباء الجوي (Aerosol Optical Depth) في كامل عمود الغلاف الجوي- في المملكة لا تتبع نمطاً موحداً، بل تتسم بتفاوتات إقليمية وموسمية واضحة. كما تؤكد هذه الدراسات أن الهباء الجوي لا يتأثر بالعوامل الإقليمية المرتبطة بالرياح فقط، بل كذلك بخصائص طبوغرافية ومناخية محلية؛ ممّا يؤدي إلى اختلافات في تركيزات الهباء الجوي بين المناطق، ومن موسم إلى آخر. وعلى الرغم من ذلك فإن معظم الدراسات السابقة ركزت على المستوى الإقليمي العام، سواء على نطاق المملكة أو شبه الجزيرة العربية، مع اهتمام بارز بالمناطق الصحراوية الرملية، إلى جانب الأجزاء الشرقية والشمالية الداخلية، بينما بقية المناطق الجنوبية الغربية من المملكة أقل تمثيلاً في الأدبيات العلمية المتعلقة بالهباء الجوي، على الرغم من امتيازها بطبيعة جغرافية مختلفة من تضاريس حادة الانحدار وارتفاعات كبيرة تُساهم في خلق تأثيرات قوية للرفع التضاريسي، بالتزامن مع الدورات الهوائية الناتجة من تفاعل اليابس والبحر، فضلاً عن تأثرها بأنماط مناخية موسمية متباعدة؛ ونتيجة لذلك، فإن التفاعل بين هذه العوامل ينشأ

عنه -على الأرجح- مسارات نقلٍ للهباء الجوي، وأنماط توزيعٍ رأسي تختلف بصورةٍ جوهرية عن تلك السائدة في بقية مناطق المملكة (Notaro et al., 2013; Yu et al., 2013).

وفي هذا السياق؛ وضح عددٌ من الدِّراسات وجود تباينٍ موسمي في أحمال الغبار والهباء الجوي بين أجزاء المملكة؛ حيث تُسجل المناطق الشمالية والشرقية ذروات خلال فصل الربيع، في حين تتسم المناطق الجنوبية الغربية بنشاطٍ غباري خلال فصل الصيف؛ وذلك نتيجة لعوامل عدة، منها: تباين الأنظمة الجوية السائدة من شدة الرياح السطحية وأنماط النقل الإقليمي للغبار (Albugami et al., 2019; Ali & Assiri, 2019; Ali et al., 2017; Rahman et al., 2024). من ناحية أخرى؛ تشير دراساتٌ أخرى إلى أنَّ المناطق الجنوبية من الواجهة الغربية للمملكة - لا سيما سهل تهامة الساحلي - يمكن أن تعمل كمصدرٍ محلي لانبعاث الغبار (Anisimov et al., 2015; Kalenderski & Stenchikov, 2016; Prakash et al., 2017)، مع تأثر تلك المناطق المطلة على البحر الأحمر -بما في ذلك مرتفعات السروات- بصورةٍ متكررة بالغبار المنقول من مصادر بعيدة كشمال شرق أفريقيا، بالإضافة إلى مصادر إقليمية داخل شبه الجزيرة العربية (Kalenderski & Stenchikov, 2016; Notaro et al., 2013; Yu et al., 2013). فعلى سبيل المثال، تُظهر تحليلات مسارات حركة الهواء (Trajectory Analyses) أنَّ جنوب غرب المملكة يتأثر بعدة مساراتٍ جوية ناقلة للغبار من مصادر بعيدة، كما أنَّ التأثير التضاريسي لجبال السروات يُساهم في رفع الكتلة الهوائية في أثناء تطور الحالات الغبارية (Notaro et al., 2013).

لذا تُعدُّ المناطق الجنوبية الغربية من المملكة -بما يشمل مناطق: الباحة وعسير وجازان ونجران- من المناطق التي تمثل مجالاً مهماً للرصد والتحليل في دراسات الهباء الجوي؛ نظراً لما تتفرّد به من خصائص طبوغرافية ومناخية، بجانب ما تشهده بعض أجزائها من تزايدٍ في مستويات الهباء بالتزامن مع ارتفاعٍ في درجات حرارة السطح وانخفاضٍ في رطوبة التربة والرطوبة الجوية (Kunchala et al., 2024). فعلى سبيل المثال؛ يؤثر الغبار في أنماط الهطول على المناطق الجنوبية على امتداد ساحل البحر الأحمر، من خلال التأثير في الخصائص الميكرو فيزيائية للسحب، وكذلك يسهم في تقليل كمية الأمطار عبر تقليل عمليات تسخين سطح اليابسة نتيجة لانخفاض الإشعاع الشمسي الواصل إليه؛ ومن ثمَّ ينخفض التباين الحراري بين اليابس والبحر؛ ممّا يؤدي إلى إضعاف تأثير دورة نسيم البحر ومن ثمَّ الحد من نقل الرطوبة نحو الداخل (Parajuli et al., 2022). وتكتسب هذه التأثيرات أهمية خاصة في الأجزاء

الجنوبية الغربية؛ حيث تمثل الأمطار عنصراً أساسياً لدعم الأنظمة البيئية -التي يعاني بعضها إجهاداً بيئياً (Al-Huqail & Islam, 2025)- والأنشطة الزراعية، وتعزيز استدامة الموارد المائية المحلية. كما أنّ هذه الأجزاء تحتضن أنظمتها بيئية واقتصادية تتأثر بدرجة عالية بتقلبات الغبار والهباء الجوي. فارتفاع مستويات الهباء الجوي ينعكس سلباً على الجاذبية السياحية لتلك المناطق، ويؤثر على الإنتاج الزراعي ونمو الغطاء النباتي، وقد يسهم في تلوث المصادر المائية، إضافة إلى دوره في نقل مسببات الحساسية وبعض نواقل الأمراض (Alsubhi et al., 2022; Notaro et al., 2015; Prakash et al., 2015)، وغيرها من التبعات الصحية والبيئية.

وضمن هذا الإطار الجغرافي، تمثل منطقة الباحة حالة دراسية ذات أهمية خاصة في ظل غياب دراسات مستقلة؛ فهي تحوي بيانات طبيعية تخضع لإجهاد بيئي (Al-Huqail & Islam, 2025)، وتعدّ من أبرز المقاصد السياحية خلال فصل الصيف، وتقع ضمن نطاق جغرافي يتسم بطبيعة جغرافية يمكن أن تُنتج تبايناً موسمياً ملحوظاً في خصائص الهباء الجوي. ومع ذلك لا تزال منطقة الباحة أقل تناولاً في الأدبيات العلمية، في حين أنّ الملاحظات الميدانية للسكان المحليين تشير إلى زيادة في تكرارية الأحمال العالية للهباء الجوي خلال الصيف، وهو ما يتزامن مع ذروة النشاط السياحي؛ ممّا يُعزّز الحاجة إلى دراسة وتحليل السلوك المكاني والزمني للهباء الجوي على المستوى المحلي للمنطقة؛ لذا هدفت هذه الدراسة إلى تقديم تحليلٍ للسمات المكانية والزمانية السائدة للهباء الجوي في منطقة الباحة اعتماداً على بيانات شهرية لفترة 25 سنة (2000-2024)، باستخدام إطار تحليلي إحصائي مكاني، يتيح تحديد الأنماط المكانية السائدة وإبرازها ورصد خصائصها الموسمية، إضافة إلى ذلك سعت الدراسة إلى تقييم مدى مساهمة الرياح السطحية (سرعة واتجاهاً) كعاملٍ مناخي في تفسير السمات المكانية والزمانية المرصودة للهباء الجوي؛ بما يُعزّز الفهم للعمليات المسؤولة عن الأنماط والخصائص المكتشفة.

وفي هذا السياق يلاحظ أنّ معظم الدراسات السابقة ركزت على الأنماط الإقليمية العامة للهباء الجوي، في حين تسعى هذه الدراسة إلى تقديم إطار تحليلي إحصائي مكاني (Geospatial Statistical Analysis) أكثر تفصيلاً لدراسة الأنماط المحلية وتبايناتها، مع إمكانية تعميمه على مناطق أخرى داخل المملكة؛ لدراسة تباين الهباء الجوي والعوامل المؤثرة فيه ضمن إطار يدمج بين البعد المكاني والبعد الزمني، مع إمكانية مواءمته لدراسة ظواهر أخرى. يعتمد هذا الإطار على دمج منهجيات متعدّدة المتغيرات، تشمل: تحليل المركبات الرئيسية

(Principal Component Analysis)، القائم على النمط المكاني (S-mode) لاستخلاص الأنماط المكانية السائدة -بدلاً من متوسطات عامة- وتتبع السلوك الزمني لتلك الأنماط. إلى جانب ذلك جرى توظيف تحليل التباين الأقصى (Maximum Covariance Analysis) لتحديد أنماط التباين المشترك بين الهباء الجوي والرياح عبر تهيئتين تحليليتين تُمكنان من مقارنة دور كُلٍّ من سرعة الرياح واتجاهها بشكلٍ مستقل. وتكمن قوة هذا النهج في أنه يتيح تحديد البنية المكانية السائدة وتحديد فترات نشاطها وتباينها استناداً إلى سلوكٍ كامل السلاسل الزمنية -بدلاً من المتوسطات-؛ ممّا يُعزّز شمولية النتائج ويدعم توظيفها في التقييمات والقرارات البيئية والتطبيقات المناخية.

المنهج

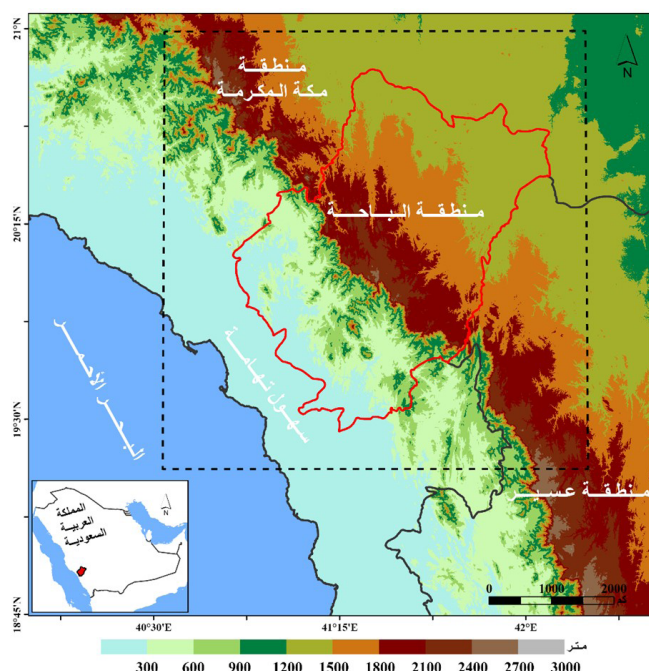
منطقة الدراسة

تقع منطقة الباحة -كما هو مبينٌ في شكل 1- في جنوب غرب المملكة العربية السعودية ضمن سلسلة جبال السروات، وتشكّل جزءاً من المنطقة الانتقالية بين السهول الساحلية الغربية (سهل تهامة) والمنحدرات الجبلية العالية للدرع العربي والأجزاء الداخلية للمملكة. ومن المنظور الجغرافي الطبيعي، تنقسم منطقة الباحة إلى ثلاثة نطاقاتٍ جغرافية متباينة من الغرب إلى الشرق. النطاق الأول يتمثل في سهول تهامة الساحلية (النطاق الغربي)، التي تمتدُّ على الجانب الغربي المطل على البحر الأحمر، ويتميّز بتضاريس منخفضة الارتفاع، ويوصف هذا السهل الساحلي بأنه شريطٌ انتقالي بين ساحل البحر الأحمر والجهة الجبلية الشرقية المجاورة. أمّا النطاق الثاني؛ فيمثل حزام جبال السروات/الحجاز المركزي (النطاق الأوسط)، الذي يهيمن على الجزء الأوسط من المنطقة، ويتميّز بتضاريسه المرتفعة والمتشعبة ذات الطبيعة الوعرة والمنحدرات الحادة؛ حيث تتراوح الارتفاعات فيه بين 1700 متر و2500 متر، كما في شكل 1. وتُعدُّ هذه الجبال عاملاً رئيساً يتحكم في المناخ والهيدرولوجيا الإقليمية للمنطقة؛ وذلك من خلال إحداث تدرجاتٍ في أنماط درجات الحرارة والهطول، وتشكيل البنية المكانية لأحواض التصريف الرئيسة في المنطقة. وإلى الشرق من حزام السروات يقع النطاق الثالث (النطاق الشرقي)؛ حيث يتحوّل سطح المنطقة إلى سهلٍ شرقي أكثر اتساعاً يشكّل في المجمل هضبة داخلية. ويتميّز هذا النطاقُ عموماً بانحداراتٍ متوسطة ويضم مساحاتٍ أوسع؛ حيث يمثل هذا النطاق مرحلة انتقالية نحو داخل شبه الجزيرة العربية.

وبوجه عام؛ يمكن فهم الطبيعة الجغرافية لمنطقة الباحة كنظام متداخل بين الجبال والسهول، وهذا ما يشكل أهمية بالغة للدراسات البيئية والمناخية. فعلى سبيل المثال، تشير بعض الدراسات التي تناولت العواصف الغبارية في المملكة وإقليم البحر الأحمر إلى أن حدوث الحالات الغبارية وتباينها المكاني والزمني يرتبطان بدرجة كبيرة بأنظمة الرياح السائدة ومسارات النقل الجوي (Notaro et al., 2013; Yu et al., 2013)، وفي المقابل؛ توضح دراسات أخرى أن توزيع الهباء الجوي في هذه الأجزاء لا يقتصر على الطبقة السطحية من الغلاف الجوي، بل قد يمتد رأسياً على هيئة طبقات بخصائص مختلفة، وهو ما يُعدّ عاملاً مهماً عند تفسير انتقال الغبار وتراكمه (Zhang et al., 2022). وبناءً على ذلك؛ يمكن أن يسهم التدرج التضاريسي من الغرب إلى الشرق في منطقة الباحة (تهامة، جبال السروات، الداخل الشرقي) في اختلاف قابلية تعليق الغبار، ومستويات انتقاله، واحتمالية حدوث خلط هوائي بين الطبقات القريبة من سطح الأرض والطبقات الأعلى في أثناء الحالات الغبارية (Parajuli et al., 2022).

شكل 1

خريطة توضح الموقع الجغرافي وارتفاعات السطح لمنطقة الدراسة



ملاحظة. يُوضح الإطار المُقطع الأسود حدود النطاق الجغرافي للتحليل.

وبهدف رفع كفاءة التحليل المكاني للهباء الجوي وتحقيق تمثيل مكاني ومناخي أكثر شمولية؛ جرى توسيع نطاق منطقة الدراسة ليشمل نطاقاً جغرافياً أوسع يحيط بمنطقة الباحة، كما هو في شكل 1. وقد جاء هذا التوسيع نتيجةً للامتداد الساحلي غربي المنطقة، وما ينتج عنه من تغيرات في خصائص الرياح واتجاهات النقل؛ لذلك يشمل نطاق الدراسة بعض الأجزاء من المناطق الانتقالية المجاورة؛ لضمان تغطية مناسبة تتوافق مع الطبيعة الجغرافية للمنطقة، ومع طبيعة انتقال الهباء الجوي وانشاره.

البيانات

تُعدُّ بياناتُ الرصد الأرضية لخصائص الهباء الجوي والمتغيرات الجوية في منطقة الدراسة محدودة، وغير مناسبة لرصد التباينات المكانية على مستوى منطقة الدراسة؛ نظراً لمحدودية التغطية المكانية لشبكات الرصد الأرضية، ولكون العديد من المحطات تعاني انقطاعاً في السجلات أو قصر مدتها الزمنية. وللتغلب على هذه القيود ولضمان الاستمرارية المكانية والزمانية لبيانات الرصد، استُخدمت بياناتُ العمق البصري للهباء الجوي (Aerosol Optical Depth) المستمدة من الأقمار الصناعية وبيانات إعادة التحليل الشبكية المناخية (Reanalysis). توفرُ مصادرُ البيانات هذه تغطيةً زمنيةً ومكانيةً متصلة، وهي ذات استخدام بشكلٍ شائع في دراسات العمق البصري للهباء الجوي والدراسات المناخية على المستويين المحلي والعالمي (على سبيل المثال، Labban & Butt, 2023; Parajuli et al., 2022; Rahman et al., 2024; Tariq et al., 2023)؛ حيث تُظهر تلك البيانات مدى قدرة الهباء الجوي على تقليل نفاذية الأشعة عبر الغلاف الجوي نتيجة التشتت والامتصاص؛ بسبب الجسيمات العالقة/الهباء على كامل عمود الغلاف الجوي؛ لذا فإنَّ ارتفاعَ قيم العمق البصري للهباء الجوي يدلُّ على انخفاض نفاذية الأشعة؛ ومن ثمَّ يُعطي دلالة كمؤشرٍ على زيادة أحمال الغبار والهباء في الغلاف الجوي، وهذا ما يوفرُ أداةً كمية مناسبة لدراسة التباين المكاني والزمني للغبار والهباء الجوي.

استُخدمت بياناتُ العمق البصري للهباء الجوي الشهرية للفترة الزمنية من عام 2000 إلى عام 2024 من قاعدة بيانات "LGHP" الجيل الثاني (Bai et al., 2024)، وهي مجموعة بياناتٍ تمتازُ بتغطية عالمية للهباء الجوي خالية من الفجوات الزمانية والمكانية. كما أنَّها معتمدة على إطارٍ واسعٍ من البيانات لرصد العمق البصري للهباء الجوي من مصادر متعددة من الأقمار الصناعية،

والقياسات الأرضية، ومخرجات النماذج العددية، وبيانات إعادة التحليل المناخي، من خلال عملية تنسيق قائمة على خوزارمية محسّنة. يوفر هذا الإطار تقديراتٍ للعمق البصري للهباء الجوي بشكلٍ جيد، وبوضوح مكاني يبلغ 1 كم مع تغطية عالمية منذ عام 2000 حتى عام 2024 وبتوافقٍ عالٍ مع القياسات الأرضية؛ ممّا يجعلها مناسبة لتحليلاتٍ واسعة النطاق للهباء في الغلاف الجوي.

ولتقسيّ علاقة الأنماط المناخية للرياح السطحية مع الأنماط المكانية والزمانية للهباء الجوي، استخدمت بيانات سرعة الرياح السطحية الشهرية واتجاهها (2000-2024) من قاعدة بيانات إعادة تحليل المناخية الأرضية الجيل الخامس (ERA5-Land Reanalysis)، المُقدّمة من المركز الأوروبي للتنبؤات الجوية المتوسطة المدى بوضوح مكاني يبلغ 0.1 درجة. وعلى وجه التحديد، استُخدمت المتوسطات الشهرية للحقلين الأفقيين للرياح على محور شرق-غرب (الرياح الزونية-U)، وعلى محور شمال-جنوب (الرياح الزوالية-V)، ثم استخرجت سرعة الرياح لثلاثة أوقات رصد سينوبتيكية (Synoptic) محلية، وهي الساعة 9 صباحاً و15 مساءً و21 مساءً. وقد اختيرت هذه الأوقات لتمثيل مراحل مختلفة من الدورة اليومية لطبقة الحدّ الجوي (Boundary Layer)، وهي فترة الانتقال الصباحية، وطبقة الخلط النهارية في أعلى مراحلها، وطبقة الحدّ الليلي المستقرة. وتمثل فترة ما بعد الظهر، على وجه الخصوص، الأوضاع التي تكون فيها الرياح السطحية أكثر ارتباطاً بالدوران الجوي الواسع النطاق، وعمليات النقل بعيد المدى، في حال وجودها.

استخلاص الأنماط المكانية السائدة وتبايناتها الزمانية

جرى الاعتمادُ على تحليل المكونات الرئيسية (Principal Component Analysis) لاستخلاص ودراسة الأنماط المكانية والزمانية السائدة للهباء الجوي خلال الفترة (2000-2024). تتكوّن بيانات العمق البصري للهباء الجوي من 300 قياسٍ شهري وبوضوح مكاني 1 كم؛ ممّا يُشكل مصفوفة زمانية مكانية عالية الأبعاد يصعبُ تحليلها الشمولي بالأدوات الوصفية التقليدية؛ ولذا يُعدُّ تحليل المكونات الرئيسية مناسباً لهذا النوع من البيانات؛ لأنّه يتيحُ إمكانية تقليل الأبعاد بكفاءة تحافظُ على الأنماط السائدة ضمن إطارٍ زمني ومكاني؛ ممّا يسمَحُ باستخلاص أنماط الهباء الجوي الرئيسية ذات الأهمية الأكبر. يُعدُّ هذا التحليل منهجيةً إحصائية متعددة المتغيرات شائعة الاستخدام، تُحدِّدُ أنماط التباين المتعامدة من خلال تحليل مجموعات البيانات

المتعددة إلى عددٍ محدود من المكونات الرئيسية (Principal Component)، يُمثل كلُّ منها نمطاً مميزاً وقابلاً للتفسير ضمن البُعدين المكاني والزمني. في هذه الدراسة، طُبِّق تحليل المكونات الرئيسية باستخدام النمط المكاني (S-mode) الذي يُركز على التباين المكاني من خلال تحديد السمات/الأنماط المكانية لأحمال الهباء الجوي التي تتكرر باستمرار. وبعبارة أخرى، يستهدف هذا التحليل تحديد أنماط/أوضاع (Modes) مكانية سائدة تُظهر كيفية توزُّع الهباء الجوي، مع تتبُّع تغيُّر قوَّة هذه الأنماط عبر الزمن من خلال السلاسل الزمنية لهذه الأنماط. من الناحية التطبيقية للنمط المكاني (S-mode)، جرى اعتبار البُعد المكاني (المواقع) هو المتغيِّر الأساسي، بينما تمثِّلُ القياساتُ الشهرية عددَ الحالات. وعليه؛ يمكن استخراج الأنماط المكانية السائدة التي تفسِّرُ أكبر قدرٍ من التباين الكلي في بيانات السلاسل الزمنية للهباء ضمن سياقٍ مكاني.

ولضمان التقاط التباينات الشهرية بشكلٍ أفضل مع المحافظة على أنماط الدورة الموسمية المناخية، جرى إزالة المتوسط المناخي العام للسلسلة الزمنية لكل خلية، ثم إجراء تحليل المكونات الرئيسية اعتماداً على مصفوفة التباين المشترك (Covariance Matrix)؛ وذلك للحفاظ على التباين المطلق للبيانات لضمان تمثيل أنماط التباين السائدة بواقعية أفضل. تنتجُ هذه الخطوة مجموعة من المكونات الرئيسية المكانية؛ حيث يمثِّل كلُّ مكونٍ (Component) نمطاً مكانياً مميزاً لتوزيع الهباء الجوي، في حين تمثِّلُ معاملات الدرجات (Scores) للمكون السلاسل الزمنية المشتركة بين المواقع داخل ذلك المكون. لتحديد عدد المكونات الرئيسية التي يمكن الاحتفاظ بها، اختبرت المكونات التي تحقق قيمة جذر كامن أكبر من واحد ($Eigenvalue > 1$) وقدرةً تفسيريةً أعلى من واحد. ولتقييم الأنماط المتحصل عليها إذا ما كانت من المكونات المتجاورة المحتفظ بها قابلة للتمييز إحصائياً، طُبِّق اختبار North عبر تقييم قابلية فصل المكونات الرئيسية من خلال تقييم التداخل بين القيم الذاتية/الجذور الكامنة لها.

دور الرياح في الأنماط المكانية والزمانية للهباء الجوي

كخطوةٍ أوليةٍ أُجري تقييمٌ مناخي شمولي لأنماط توزيع الرياح (سرعةً واتجاهاً) من خلال إعداد خرائط مناخية مُركبة (Composite Maps)؛ بهدف توصيف الحالة المناخية السائدة للرياح وتحديد السمات الزمانية والمكانية الرئيسية لها في منطقة الدراسة. وعلى الرغم من فائدة هذا التحليل في توفير تصوُّرٍ شمولي لدور الرياح، فإنَّه محدودٌ بطبيعته؛ إذ لا يوفرُ أداةً قياسيةً كمية؛ لذا جرى كذلك استخدام تحليل التباين الأقصى (Maximum Covariance)

(Analysis): يهدف دراسة التغاير المشترك (Covariance) بين حقول الرياح (سرعةً واتجاهاً) والهباء الجوي؛ وذلك عبر تحديد الأنماط/الأوضاع المتزامنة مكانياً، التي تُظهر تقلبات الرياح الأكثر ارتباطاً بتقلبات الهباء الجوي؛ أي: الأنماط التي تُحقق أعلى قدرٍ من التغاير المشترك بين المتغيرين. يُعدُّ تحليلُ التغاير الأقصى أحد الأساليب الإحصائية المستخدمة لدراسة التغاير المشترك بين متغيرين يمتلكان بُعداً مكانياً وزمانياً (في الدِّراسات المناخية وغيرها)؛ وذلك من خلال تحديد الأنماط/الأوضاع المكانية الرئيسة التي تتشارك بأكبر قدرٍ من التقلبات المتزامنة/المشتركة في سلاسلهما الزمنية. ويعتمدُ هذا الأسلوبُ على إنشاء مصفوفة التغاير المشترك بين متغيرين، ثم تحلّل هذه المصفوفة باستخدام تحليل القيم المفردة (Singular Value Decomposition)، وتُفكك إلى قيم ذاتية/جزرية ومتجهات (Eigenvalues and Eigenvectors). يُنتج هذا التحليل أزواج من الأنماط المكانية المترافقة (Coupled Spatial Pair)، تُسمّى عادةً بأنماط/أوضاع ثنائية (Coupled Mode)، لكلٍّ منها سلسلة زمنية تُعبّر عن الطبيعة الزمنية المشتركة، ومتى يكون هذا النمط قوياً أو ضعيفاً (An, 2003; Deng et al., 2023; Xue et al., 2018)؛ لذا يوفّر هذا التحليل آلية كمية تمكّن من استخلاص الأوضاع المكانية التي تُظهر تغيّراً متزامناً بين الرياح والهباء الجوي؛ بهدف فهم كيف ترتبطُ تغيّرات/تقلبات الرياح (سرعةً واتجاهاً) بتغير أحمال الهباء الجوي مكانياً وزمانياً.

اعتمد هذا التحليلُ على بيانات الرياح السينوبتيكية، وبيانات الهباء الجوي الشهرية بعد إزالة المتوسط المناخي وحساب الشذوذ؛ وذلك للتقليل من تأثير الدورات الموسمية، وللحدّ من تأثير التباين (Variability) على النطاق المناخي المحلي، ولضمان اتّساق البيانات جرى تعديل الوضوح المكاني لبيانات الهباء الجوي إلى 0.1 درجة باستخدام أسلوب المتوسط المكاني استناداً إلى شبكة بيانات الرياح (0.1 درجة) كوضوح مرجعي. ولمراعاة تقارب خطوط الطول نحو خطوط العرض العليا، ولضمان مناسبة الترجيح المكاني بشكلٍ أفضل، ضُربت شذوذات نقاط الشبكة النهائية المشتركة بالجذر التربيعي لجيب تمام خط العرض قبل تطبيق تحليل التغاير الأقصى؛ من أجل تقليل احتمالية أيّ تضخيمٍ لخلايا الشبكة النهائية. بعد ذلك رُتِّبت هذه الشذوذات في صورة مصفوفات مكانية-زمانية، ثم جرى حساب مصفوفة التغاير المتبادل/المشترك بين حقل الرياح وحقل الهباء الجوي عبر الزمن؛ بحيث تُعبّر كل قيمة في هذه المصفوفة عن مقدار التغاير بين نقطة مكانية لمتغير الرياح ونقطة مكانية لمتغير

الهباء عبر السلسلة الزمنية (2000-2024). تنتج عن هذه الخطوات مصفوفة التغير المتبادل، التي تُلخص أين وكيف تتزامن زيادات متغير الرياح وانخفاضاتها مع زيادات متغير الهباء الجوي وانخفاضاته. بعد ذلك جرى تحليل هذه المصفوفة باستخدام تحليل القيم المفردة لاستخراج أنماط/أوضاع ثنائية (Coupled Mode)، حقل للرياح وآخر للهباء، مع السلاسل الزمنية المقابلة لها التي توضح أقصى تباين مشترك بين المتغيرين.

ونظراً للطبيعة الثنائية لمتغير الرياح (سرعةً واتجاهاً)، فقد طُبِق تحليل التغير الأقصى وفق تهيئة (Configurations) تحليليتين مستقلتين: الأولى تربط الهباء الجوي بسرعة الرياح، والثانية تربط الهباء الجوي باتجاه الرياح المُمثل في مركبتها الأفقيتين (الرياح الزونية، شرق-غرب، والرياح الزوالية، شمال-جنوب)؛ وذلك لدراسة اقتران الهباء الجوي مع كل من سرعة الرياح واتجاهها بشكل منفصل. في التهيئة الأولى، استُخدمت شذوذات سرعة الرياح والهباء الجوي لاكتشاف طبيعة الأنماط/الأوضاع التي تربط بين شدة الرياح وزيادة الهباء الجوي أو نقصانه. أمّا في التهيئة الثانية؛ فجرى جمع مركبتي الرياح الأفقيتين في مصفوفة متجه واحد قبل حساب التغير. هذه الصياغة تساعد على فهم دور اتجاه التدفق الهوائي بشكل أوضح، وتتيح الكشف عن الدور الذي قد لا يظهر عند النظر إلى متغير سرعة الرياح بمفرده. في كلتا التهيئتين استُخرجت سلاسل زمنية تمثّل كيف يتغيّر كل نمط زمنياً؛ وذلك عبر إسقاط بيانات الشذوذ على الأنماط/الأوضاع المستخرجة. ثم استُخدمت هذه السلاسل لتقييم مدى ترابط تغيّرات الرياح مع تغيّرات الهباء الجوي زمنياً ومكانياً. وأخيراً؛ قيسَت أهمية كل نمط من خلال مقدار ما يفسّره من التغير المشترك الناتج، بجانب دلالاته الإحصائية استناداً إلى اختبار مونت كارلو، الذي استخدم 1000 توليد عشوائي من خلال إعادة الترتيب مع قيمة حدية عند مستوى 95%.

ولتسهيل قراءة النتائج، جرى توحيد إشارة (Sign) النمط الأول الرئيس في تحليل التغير الأقصى وفق اصطلاح موحد؛ حيث استُخدمت الخلايا التي تظهر فيها أوزان مكانية عالية للنمط في خريطة نمط الهباء الجوي -أي: الخلايا الواقعة ضمن أعلى 25% - لتحديد ما يمكن تسميته ببصمة الهباء المكانية للنمط؛ بمعنى المناطق التي يظهر فيها تأثير هذا النمط بأوضح صورة. بعد ذلك حُسب متوسط الانحراف للهباء الفعلي فوق هذه البصمة، ثم جرت مقارنة هذا المتوسط بين الأشهر التي يكون فيها مؤشر النمط موجباً والأشهر التي يكون فيها سالباً، ثم بعد ذلك إذا أظهرت المقارنة أنّ متوسط الانحراف للهباء فوق البصمة كان أعلى من الصفر،

فهذا يدل على أنَّ الحالة التي يمثلها هذا النمط ترتبط بارتفاع الهباء عن متوسطه المناخي في تلك المنطقة (بمعنى أنَّ أحمال الهباء تكون أعلى من المعتاد)، والعكس صحيح بالمقابل. وتجدر الإشارة والتأكد إلى أنَّ هذا الإجراء استُخدم كاصطلاح لعرض النتائج وتفسيرها ضمن نسقٍ موحد فقط، دون أن تُغيّر هذه الآلية نتائج البنية المكانية للنمط أو مقدار التغير المشترك الذي يُفسّره.

النتائج والمناقشة

الأنماط المكانية السائدة للهباء الجوي

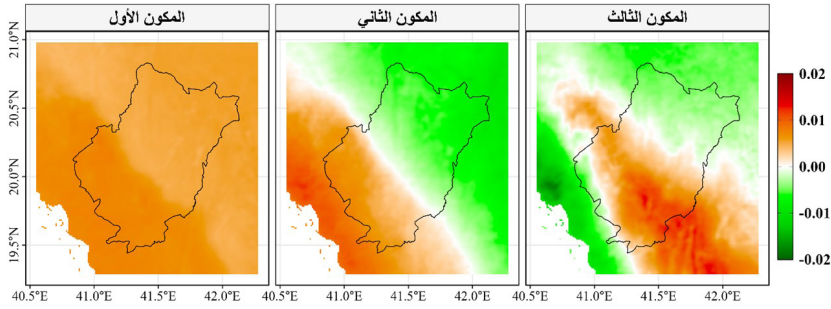
لتقييم عدد المكونات الرئيسية التي ينبغي الاحتفاظ بها للتفسير والتحليل، فُحصت القيم الذاتية/الجذر الكامن (Eigenvalues) ونسبة التباين التي تُفسّرها المكونات الناتجة بجانب نتائج تحليل North. تركّز التباين في المكونات الرئيسية الثلاثة الأولى؛ حيث فسّر المكون الرئيس الأول 89.5% من التباين الكلي، في حين فسّر المكونان الرئيسان الثاني والثالث 6% و2% على التوالي؛ وتمثل هذه المكونات الثلاثة قدرة تفسيرية تراكمية تبلغ 97.5%. في المقابل؛ كانت مساهمة المكونات ذات الرتب الأعلى (المكون الرابع والخامس وهكذا) ضئيلة؛ حيث يُفسر كل مكونٍ منهما تبايناً أقل من 0.5%؛ ممّا يُشير إلى أنَّ التباينات المكانية السائدة يُمكن وصفها بوساطة المكونات الثلاثة الأولى؛ لكونها تُفسّر معظم التباين المكاني الكلي (Total Spatial Variance) للهباء الجوي، في حين أنَّ المكونات الأخرى لا تضيف أي تفسيرٍ إضافي ذي أهمية. كما أظهرت نتائج تحليل North أنَّ المكونات الثلاثة الأولى منفصلة إحصائياً ولا تُظهر تداخلاً في القيم الذاتية؛ ممّا يدل على أنَّها تمثل أنماطاً مستقلة وأن كل مكون يُعبّر عن نمط مميز من التباين غير متأثر بالمكونات المجاورة. وبناءً على ذلك؛ يركز التحليل والمناقشات اللاحقة على المكونات الرئيسية الثلاثة الأولى؛ لكونها تُجسّد معظم التباين المكاني الكلي. وتجدر الإشارة هنا إلى أنَّ التباين العالي الذي يفسره المكون الرئيس الأول (89.5%) يدل على أنَّ الهباء الجوي في منطقة الدراسة يهيمن عليه نمطٌ تباين مكاني قوي وواسع النطاق؛ ممّا يعكس على الأرجح تأثير الدورة الموسمية والسلوك المكاني المتماسك عبر نطاق الدراسة، مقارنة بالتباينات المكانية الإقليمية أو المحلية التي تعكسها المكونات اللاحقة. وهذا السلوك شائع في تحليلات المكونات الرئيسية للأنماط المكانية لبيانات المناخ.

يعرضُ شكل 2 التوزيع المكاني لنتائج المكونات الثلاثة الأولى، ويُظهر المكون الأولي بنيةً مكانيةً متجانسة إلى حدٍ كبير؛ ممّا يشيرُ إلى أنّ هذا المكون يمثلُ النمط الإجمالي للهباء الجوي في المنطقة بأكملها من الناحية الموسمية الإجمالية، بدلاً من الفروقات المكانية المحلية/الموضعية (Localized). أي: إنّهُ يمثلُ الدورة السنوية المناخية العامة. في المقابل؛ تميّزُ المكونُ الثاني بتدرجٍ إقليمي واضح يُقسّمُ المنطقة إلى نطاقين: شرقي وغربي بإشارات أحمال (Loadings) متعاكسة. هذا التوزيعُ المكاني يتطابقُ مع طبوغرافية سطح المنطقة، كما هو في شكل 1؛ حيث يلاحظ أنّ التضاريسَ الجبلية تمثلُ ما يمكن وصفه بحِدٍّ فاصِلٍ بين الأجزاء الموجبة الإشارة في الجهة الغربية والأجزاء السالبة الإشارة في الجهة الشرقية؛ ممّا يشيرُ إلى أنّ التضاريسَ تُمارسُ دوراً مهماً في التوزيع الجغرافي للهباء الجوي، وعلى الأرجح من خلال تعديل مسارات تدفق الهواء، والخلط الرأسّي، وكفاءة تراكم الهباء الجوي وإزالته على جانبي خط تقسيم التضاريس؛ ونتيجة لذلك، فإنّ هذه المشاهدة تُظهر إلى حدٍّ ما بعض الإشارات المتعلقة بمصدر الهباء من الأطراف الغربية (السهل التهامي)؛ نظراً للطبيعة الطبوغرافية ذات المساحات الرملية المكشوفة للرياح الشمالية الغربية الصيفية.

هذا التأثيرُ الطبوغرافي يظهرُ كذلك في نتائج المكون الثالث، ولكن ضمن نطاقٍ جغرافي أقل كما في شكل 2؛ حيث إنّهُ من الملاحظ أنّ نمطَ المكون الثالث يُظهر تبايناً مكانياً يتركزُ على الأطراف الجنوبية من المنطقة مع امتدادٍ نحو الأجزاء الوسطى باتجاهٍ غربي-شمالي. يُبرز هذا النمطُ الاختلافات على المستوى المحلي، مع نطاقاتٍ أضيق من الأحمال (Loadings) المتعاكسة الإشارة؛ ممّا يشيرُ إلى وجود تباينٍ على نطاقاتٍ مكانية محلية على الأجزاء الجنوبية الشرقية وصولاً إلى الأجزاء الوسطى. على الرغم من أنّ هذا المكون يُفسّر جزءاً صغيراً نسبياً من التباين الكلي (2%)، فإنّ وجودَ بنية مكانية متماسكة يُشير إلى أنّ هذا السلوك المكاني ذا النطاق المحلي يتكرّرُ بشكلٍ موسمي، وإن كان ذلك بشدّةٍ أضعف من المكونين الأول والثاني. وعليه؛ فإنّ المكونَ الثالث يمكن اعتباره على أنّه نمطٌ ثانوي يصفُ التباينات المحلية/الموضعية (Localized)؛ لما تمثله هذه الأنماط المنخفضة التباين غالباً من تباينات محلية أو تأثيرات طبوغرافية دقيقة.

شكل 2

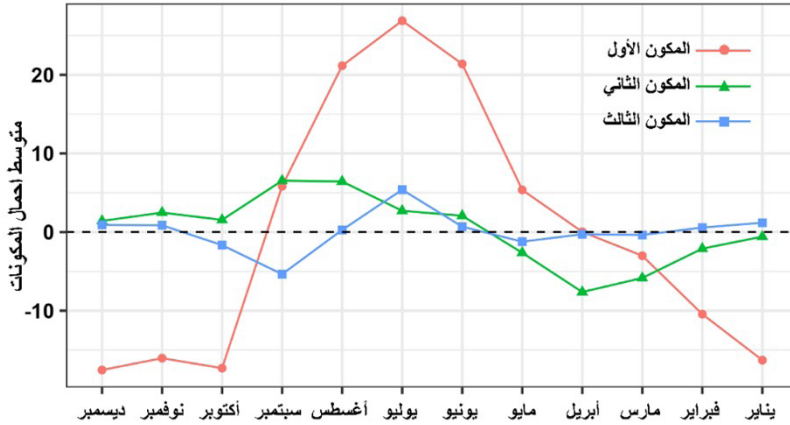
خرائط التوزيع المكاني لمعاملات الأحمال (Loadings) للمكونات الرئيسية الثلاثة الأولى الناتجة من تحليل المكونات الرئيسية، التي تمثل الأنماط المكانية الأكثر أهمية في تفسير التباين



لتقديم ملخص وصفي للدورة الموسمية المناخية للهباء الجوي ضمن سياقها المكاني، استُخدمت سلاسل المكونات الموسمية الثلاثة الأولى لحساب المتوسطات الشهرية المناخية لكل مكون. يوضح شكل 3 متوسط الدورة السنوية المناخية؛ حيث يتضح أنَّ المكون الرئيس الأول يمتازُ بدورةٍ سنوية واضحة، بقيم أحمالٍ سالبة خلال فصل الشتاء، ثم ارتفاعٍ من أواخر فصل الربيع مع ذروة واضحة في منتصف فصل الصيف، يلها انخفاضٌ تدريجي. يؤكد هذا السلوكُ السنوي أنَّ المكونَ الرئيس الأول يمثلُ النمطَ الموسمي التراكمي المهيمن للهباء الجوي على كامل منطقة الدراسة عند الربط بين نتائج شكل 2 ونتائج شكل 3، مع ملاحظة أنَّ قيم أحمال المكون الأول تميل إلى أن تكون أعلى على القطاع الغربي. وتتوافق هذه النتائج مع نتائج الدراسات السابقة، التي تشير إلى صيفية موسم الغبار في المناطق الجنوبية الغربية للمملكة (Ali & Assiri, 2019; Ali et al., 2017; Rahman et al., 2024).

شكل 3

المتوسط المناخي الشهري (2000-2024) للمكونات الرئيسية الثلاثة الأولى



في المقابل؛ يُظهر المكون الرئيس الثاني دورةً موسميةً أضعف ولكنها متماسكة، تتميزُ بقيمٍ أحماٍ تقتربُ من الصفر في مطلع فصل الشتاء، ثم تظهر مرحلة سلبية إلى أواخر فصل الربيع، تلها مرحلة انتقالية إلى قيمٍ موجبة مع ذروة واضحة خلال أواخر فصل الصيف ومطلع فصل الخريف، ثم تنخفضُ القيمُ منتصف فصل الخريف وتظل قريبة من الصفر. عند تفسير هذا السلوك الموسمي جنباً إلى جنب مع التوزيع المكاني في شكل 2، فإنَّ النتائجُ توضح وجود تباينٍ في الهباء الجوي بين قطاعين رئيسيين، هما: قطاع غربي وقطاع شرقي، وهذا بدوره يشير إلى أنَّ المكونَ الرئيس الثاني يمثل التباينات الإقليمية على مستوى منطقة الدراسة. هذا التباينُ الإقليمي يكون في أعلى حالاته خلال مرحلتين زمنيتين: إحداهما أواخر فصل الصيف ومطلع فصل الخريف عندما تكون القيمُ موجبة، والأخرى في فصل الربيع عندما تكون القيمُ سالبة، ويُفهم من ذلك أنَّ القاطعين الغربي (السهل الهامي) والشرقي لهما نمطٌ زمني متعاكس في الدورة الموسمية للهباء الجوي. تتوافق هذه النتيجة مع المشاهدات والقياسات الواقعية؛ إذ يُلاحظ تزايداً واضحاً في العوالق الجوية والنشاط الغباري في القطاع الشرقي خلال منتصف فصل الربيع، ويُعدُّ هذا التوقيتُ متسقاً مع الفترة المعروفة بذروة العواصف الغبارية على مناطق المملكة الوسطى خلال فصل الربيع (القحطاني وآخرون، 2025). وبناءً على ذلك؛ يمكن الاستدلال من النتائج في هذه الدراسة على أنَّ التأثيرات المرتبطة بالنشاط الغباري خلال فصل الربيع على المناطق الوسطى من المملكة، يمكن أن تمتدَّ لتشمل الأجزاء الشرقية من منطقة الباحة.

على الجانب الآخر؛ يُظهر المكون الرئيس الثالث دورةً موسمية ضعيفة؛ حيث تقترب قيمه من الصفر خلال فصلي الشتاء والربيع، مع مرحلة من الأحمال الموجبة في منتصف فصل الصيف، ومرحلة سلبية أوائل الخريف. عند تفسير هذا النمط الزمني جنباً إلى جنب مع النمط المكاني لهذا المكون في شكل 2، نلاحظ أنَّ هذا النمط هو نمطٌ محلي/موضعي (Localized) يظهر لفترة شهرٍ واحدٍ في فصل الصيف (يوليو)، ثم يضعف أو ينعكس بعد ذلك. ومن الناحية التفسيرية الواقعية؛ هذه السماتُ الزمنية وكذلك المكانية للمكون الرئيس الثالث تتوافقُ بشكلٍ تام مع المشاهدات المحلية على المدن والقرى الجبلية في المنطقة؛ مثل: مدينة الباحة ومدينة بلجرشي؛ حيث العوالق الجوية تنشطُ في هذه المواقع خلال منتصف فصل الصيف.

يتضح إجمالاً من خلال خرائط الأحمال المكانية (شكل 2) والدورة الموسمية للمكونات (شكل 3)، أنَّ المكون الأول يمثل النمط الموسمي السائد على كامل منطقة الدراسة، في حين تعبر المكونات اللاحقة (الثاني والثالث) عن تباينات مكانية على المستويين الإقليمي والمحلي. كما يُلاحظ وجود إزاحة زمنية واضحة بين ذروة نشاط المكون الثالث والنمط الزمني العام للمكون الثاني (شكل 3)، وهي إزاحةٌ تحملُ دلالةً مكانيةً ومناخيةً عند ربط هذه الإزاحة مع التوزيع المكاني في شكل 2؛ إذ يتبين أنَّ النطاق الموجب للمكون الثالث ينطلقُ من الأجزاء الجنوبية الغربية من المنطقة (نهاية السهل التهامي)، وهي مناطق تقع كذلك ضمن النطاق الموجب للمكون الثاني الذي يبدأ نشاطه مع مطلع فصل الصيف. غير أنَّ ذروة المكون الثالث تظهر متأخرةً بنحو شهر مقارنةً بذروة المكون الثاني؛ ممَّا يقترحُ أنَّ التراكومات الغبارية التي تتشكلُ فوق المناطق الغربية السهلية خلال المرحلة الأولى (المكون الثاني) يتم لاحقاً نقلها باتجاه المناطق المرتفعة، وهذا - على الأرجح - نتيجة تطور أوضاع النقل الجوي الموسمية تبعاً لنشاط الرياح.

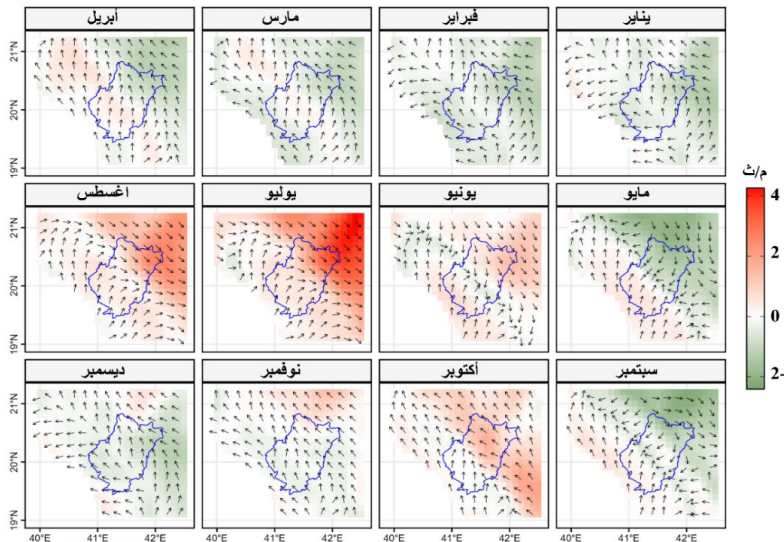
دور الرياح في الأنماط المكانية والزمانية السائدة للهباء الجوي

تُوضح الأشكال 4 و 5 و 6 السمات المناخية الشهرية لاتجاهات الرياح وانحرافات سرعة الرياح عن المتوسط المناخي خلال ثلاث فترات قياس سينوبتيكية من اليوم (الساعة 9 صباحاً، و 15 مساءً، و 21 مساءً). يُظهر الشكل تبايناً واضحاً في أنماط انحراف سرعة الرياح باختلاف الفصول وأوقات اليوم؛ إذ تسجل بعض الأشهر، لا سيما الصيفية انحرافات موجبة ملحوظة، خصوصاً في فترة النهار. ففي أشهر فصل الشتاء وأطراف فصلي الربيع والخريف، تسود رياح معتدلة إلى هادئة نسبياً، مع اتجاهات تميل إلى الرياح الجنوبية الشرقية خلال فترات

الصباح (9 صباحاً)، قبل أن تتحول تدريجياً خلال فترة بعد الظهر (15 مساءً) إلى اتجاهاتٍ أكثر انتظاماً ذات مكوّن شمالي (على الأجزاء الشرقية من منطقة الدراسة) إلى شمالي-غربي (على الأجزاء الغربية لمنطقة الدراسة)، وهذا ما يمكن عزوه إلى تحسّن عمليات نمو طبقة الخلط (Mixing Layer Growth) النهاري، وزيادة اقتران الرياح السطحية بالدوران الجوي الواسع النطاق. أمّا خلال فترة الليل (21 مساءً)؛ فتزداد حالات تشتت الاتجاهات، خصوصاً على السلاسل الجبلية؛ نظراً لتأثير الاستقرار الليلي. أمّا في أشهر الصيف؛ فتأخذ سرعة الرياح في الازدياد مع سيادة رياح شمالية غربية على الأجزاء الشرقية من المنطقة، ورياح جنوبية غربية على الأطراف الغربية من المنطقة خلال الصباح. وخلال فترة بعد الظهر تنتقل الرياح الشمالية الشرقية إلى رياحٍ شمالية، في حين تأخذ الرياح الجنوبية الغربية في الانتقال الواضح إلى رياحٍ غربية، بما يُظهر اقتراناً بين الرياح السطحية والدوران الواسع النطاق، ويقترح نشاطاً لعمليات النقل الأفقي. وخلال فترة الليل تضعفُ السرعةُ نسبياً مع تشتت الاتجاهات على المرتفعات، وسيادة للرياح الشمالية الغربية على الأطراف الغربية السهلية والشرقية بوجهٍ عام.

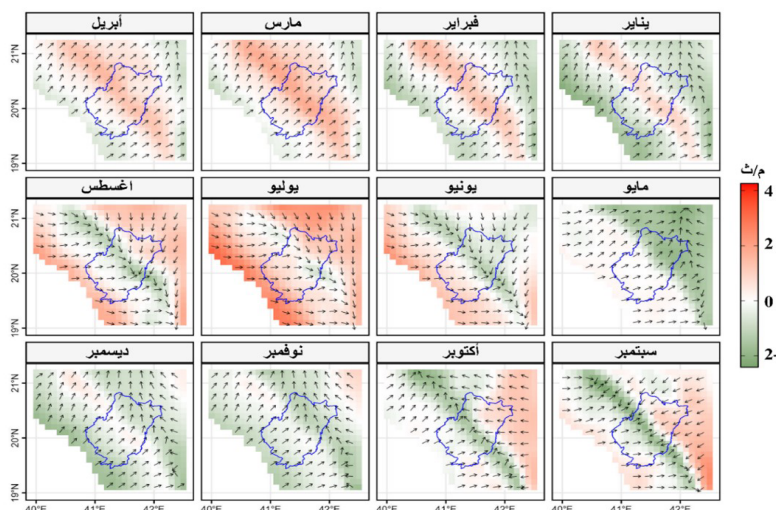
شكل 4

التوزيع المكاني للانحرافات الشهرية المناخية لسرعة الرياح السطحية (التظليل اللوني بوحدة م/ث)، والمتجهات المتوسطة للرياح (الأسهم) خلال الفترة الصباحية (الساعة 9 صباحاً) خلال الفترة 2000–2024



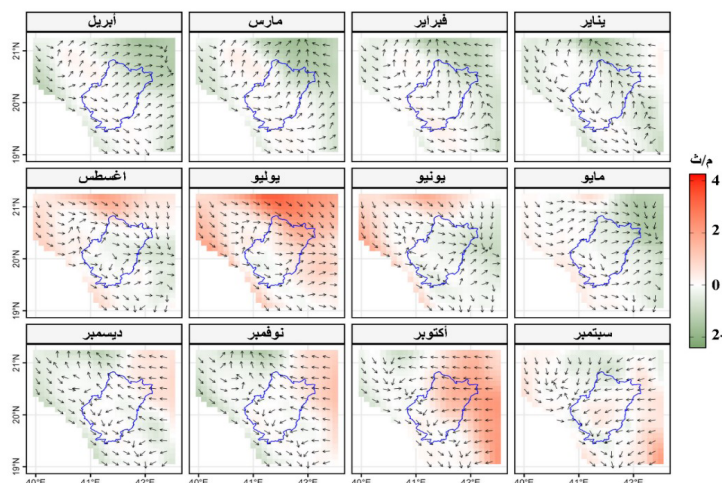
شكل 5

التوزيع المكاني للانحرافات الشهرية المناخية لسرعة الرياح السطحية (التظليل اللوني بوحدة م/ث)، والمتجهات المتوسطة للرياح (الأسهم) خلال فترة بعد الظهر (الساعة 15 مساءً) خلال الفترة 2000-2024



شكل 6

التوزيع المكاني للانحرافات الشهرية المناخية لسرعة الرياح السطحية (التظليل اللوني بوحدة م/ث)، والمتجهات المتوسطة للرياح (الأسهم) خلال فترة الليل (الساعة 21 مساءً) خلال الفترة 2000-2024



يمهّد هذا الوصف المناخي لفهم الطبيعة الديناميكي لكيفية مساهمة الرياح في أنماط الهباء الجوي؛ حيث تُظهر النتائج المشار إليها أنفاً الطبيعة الديناميكية العالية لنشاط الرياح على المستوى الموسمي اليومي (الساعة 9 صباحاً و15 مساءً و21 مساءً). هذه النتائج تُسهم في تفسير النمط الصيفي لنشاط الهباء الجوي في منطقة الدراسة؛ نظراً للتوافق الواضح بين اتجاهات الرياح وسرعتها خلال فصل الصيف كما هو مبين في الأشكال 4-6، وبين نتائج تحليل المكونات الرئيسية للأنماط المكانية المرصودة (شكل 3)، والتي تشير إلى ذروة صيفية واضحة في زيادة أحمال الهباء الجوي. يُرجح هذا التوافق دور الرياح الصيفية ذات السرعات العالية خلال العام في تعزيز عمليات النقل الرأسي والأفقي، بما يُسهم في زيادة أحمال الهباء الجوي. فخلال فصل الصيف تسود رياحٌ جنوبية غربية خلال فترات الصباح على الأجزاء الغربية (السهل التهامي)، ثم تتجه نحو تعزيز المكوّن الغربي خلال فترات الظهيرة بالتوازي مع زيادة واضحة في سرعة الرياح (الأشكال 4-6). ويبلغ هذا النمط ذروته خلال منتصف فصل الصيف، وهو ما يتوافق بشكلٍ وثيق مع الذروة المرصودة في أحمال الهباء الجوي، لا سيما فوق المناطق الجبلية المرتفعة (شكل 2، وشكل 3). ومن الناحية الديناميكية هذه النتائج ذات اتّساقٍ منطقي يمكن وصفه عبر المقترح الآتي: خلال فترات الصباح الصيفية تنشط رياحٌ جنوبية غربية على السهل التهامي؛ نظراً لتأثير التباين الحراري بين اليابسة والبحر؛ ومن ثمّ تعمل هذه الرياح في ظل بقاء طبقة الحدّ الجوية (Boundary Layer) قريبة من حالة الاستقرار النسبي على تجميع وتراكم العوالق والغبار فوق المناطق السهلية المفتوحة ذات التربة الجافة والرملية. ومع تقدّم النهار، تُسهم عمليات التسخين السطحي في زيادة عدم الاستقرار داخل طبقة الحدّ الجوية ونشاط نسيم البحر؛ ما يُؤدّي إلى تعزيز سرعة الرياح؛ ومن ثمّ نشاط عمليات الخلط والرفع الهوائي وتعزيز تعليق الغبار ونقله؛ حيث تعمل عمليات زيادة سرعة الرياح وتحول اتجاهها نحو المكوّن الغربي (رياح تميل إلى الهبوب من الغرب) على نقل الهباء نحو المناطق الجبلية؛ الأمر الذي يمكن أن يُفسّر الارتفاع الملحوظ في أحمال الهباء الجوي خلال فترة بعد الظهر على المرتفعات التي عادةً ما يجري رصدّها من السكان المحليين في منتصف الصيف عندما يبلغ هذا النمط ذروته—حين تتزامن أقصى درجات التسخين السطحي الفصلي واليومي مع أعلى سرعة للرياح، التي تُعزّز عتبات الرفع الهوائي للعوالق الجوية.

تقترح نتائج التحليل السابقة أهمية الرياح؛ نظراً للترانز المكاني والزمني مع موسم ارتفاع الهباء الجوي. ولاختبار أهمية الرياح ضمن إطارٍ منهجي كمي يمكن من خلاله التفريق

بين أهمية سرعة الرياح واتجاهاتها، استُخدِمَ تحليل التغير الأقصى. أظهرت نتائج اختبار مونته كارلو أنَّ الأنماط الأولى (من 3 إلى 5 أنماط) من تحليل التغير الأقصى تتمتع بدلالة إحصائية واضحة؛ حيث تجاوزت القيم المفردة للأنماط الأولى القيم الحدية عند مستوى 95% من التوزيع الناتج؛ ممَّا يشير إلى أنَّ هذه الأنماط تمثل تغيراً مشتركاً حقيقياً بين الحقلين المدروسين وليس عشوائياً. في المقابل، أوضحت نتائج تحليل التغير المشترك المُفسر -كما في جدول 1- أنَّ هناك نمطاً ثنائياً (Coupled Mode) رئيساً يهيمن على الجزء الأكبر من التغير المشترك بين الرياح والهباء، وهو ما يشير إلى أنَّ العمليات المرتبطة بالرياح ضمن النمط الأول تُعدُّ عاملاً محورياً في تشكيل التوزيعات العامة للهباء الجوي على كامل المنطقة؛ ما يشير إلى أنَّ تذبذب الهباء على المقياس الشهري يرتبطُ بآلية نقل جوية رئيسة تتكرر عبر الزمن. وعليه؛ يتركز التحليل والمناقشة على النمط الثنائي الأول لهيئته على الجزء الأكبر من التغير المشترك في كل تهينة.

خلال الفترة الصباحية بلغ تفسير النمط/الوضع الثنائي الأول (Mode-1) عند استخدام سرعة الرياح 98.84% من التغير المشترك بين الحقلين داخل فضاء التحليل - ليس التباين الكلي للمتغيرين - مع ارتباط إحصائي بلغ 0.51 بين السلاسل الزمنية لمركبي النمط الأول بدلالة إحصائية أقل من 0.01 (جدول 1)؛ ممَّا يدل على أنَّ الارتباط ليس عشوائياً. وهذا يشير إلى أنَّ النمط الثنائي الأول يكادُ يوضحُ معظم العلاقة المشتركة بين سرعة الرياح والهباء صباحاً، وأنَّ النمط الأول وحده يكفي لتمثيل الارتباط الزمني، الذي كان ذا إشارة موجبة؛ ممَّا يعني أنه عندما يكون النمط/الوضع الريحي قوياً في شهر ما، يكون النمط/الوضع المقابل في الهباء الجوي قوياً أيضاً في كثيرٍ من الحالات. ولكن تجدرُ الإشارة إلى أنَّ قيمة الارتباط هنا متوسطة؛ ممَّا يدل على أنَّ هناك عوامل أخرى قد تُساهم أيضاً في تغيُّر الهباء الجوي خلال الفترة الصباحية، بالإضافة إلى سرعة الرياح. في المقابل؛ ارتفعت قوة التفسير إلى 99.78% (داخل فضاء التحليل) وزادت كذلك قوة الارتباط بشكلٍ واضح إلى 0.75 عند تمثيل الرياح بصيغتها المتجهة (U, V)، وهذا يشير إلى أنَّ إدراج اتجاه الرياح يُعزِّزُ كثيراً من اتِّساق العلاقة الزمنية بين الرياح والهباء؛ بما يبرِّزُ أهمية مسار النقل في تفسير التباين المرصود في الهباء الجوي.

أمَّا في فترة بعد الظهر (الساعة 15)، فتستمرُّ هيمنة النمط/الوضع الثنائي الأحادي مع قيم مرتفعة في كلتا الهيئتين؛ إذ فسَّرَ 95.69% من التغير المشترك داخل فضاء التحليل

باستخدام سرعة الرياح، و97.1% عند تمثيل الرياح بصيغتها المتجهة، مع ارتباطات ذات دلالة إحصائية في السلاسل الزمنية؛ بواقع 0.64 و0.67 على التوالي؛ وتُظهر هذه النتائج اتساقاً ديناميكياً مع كون فترة بعد الظهر تمثل عادةً الطبقة الجوية المختلطة المكتملة التطور؛ حيث يبلغ الخلط الرأسي مداه، ويقوى اقتران الرياح القريبة من السطح بالدوران الجوي الواسع النطاق؛ ما يجعل تأثير الرياح على عمود الهباء أكثر قوة. أمّا في الفترة الليلية (الساعة 21)؛ فقد ظهر اختلاف أوضح بين التهيئتين؛ إذ انخفضت قوة التفسير للنمط الثنائي الأول إلى 81.32 % عند استخدام سرعة الرياح، على الرغم من بقاء الارتباط للسلاسل الزمنية بمقدار جيد 0.62. في حين كانت نسبة التفسير عند تمثيل الرياح بالصيغة المتجهة ذات قدرة أعلى 98.7% مع ارتباط في السلاسل الزمنية بلغ 0.63. وهذا ما يشير إلى أنه خلال الليل ومع زيادة الاستقرار وضعف الخلط الرأسي، تصبح سرعة الرياح وحدها أقل كفاءة في تفسير التغير المشترك؛ وهو ما يقترح ضعف تأثير سرعة الرياح خلال الليل؛ نظراً لبطء الرياح مقارنة مع الفترة الصباحية وبعد الظهر على الأرجح.

جدول 1

الإحصاءات الرئيسة لتحليل التغير الأقصى للنمط الثنائي الأول الرئيس (Mode-1) بين الهباء الجوي والرياح ضمن تهيئتين (Configurations) وخلال ثلاث فترات يومية.

الساعة	التهئية	نسبة التباين المفسر	معامل الارتباط
9	الهباء الجوي - سرعة الرياح	98.80	0.50
	الهباء الجوي - متجه الرياح (u, v)	99.80	0.75
15	الهباء الجوي - سرعة الرياح	95.70	0.64
	الهباء الجوي - متجه الرياح (u, v)	97.00	0.67
21	الهباء الجوي - سرعة الرياح	81.30	0.62
	الهباء الجوي - متجه الرياح (u, v)	98.70	0.63

ملاحظة: جميع معاملات الارتباط ذات دلالة إحصائية أقل من 0.01.

وبصورة عامة؛ تُبرز هذه النتائج أن إدراج متغير الرياح بالصيغة المتجهة (U, V) يرفع نسبة التغير المشترك التي يفسرها النمط الثنائي الأول خلال فترات اليوم، وهذا ما يبين

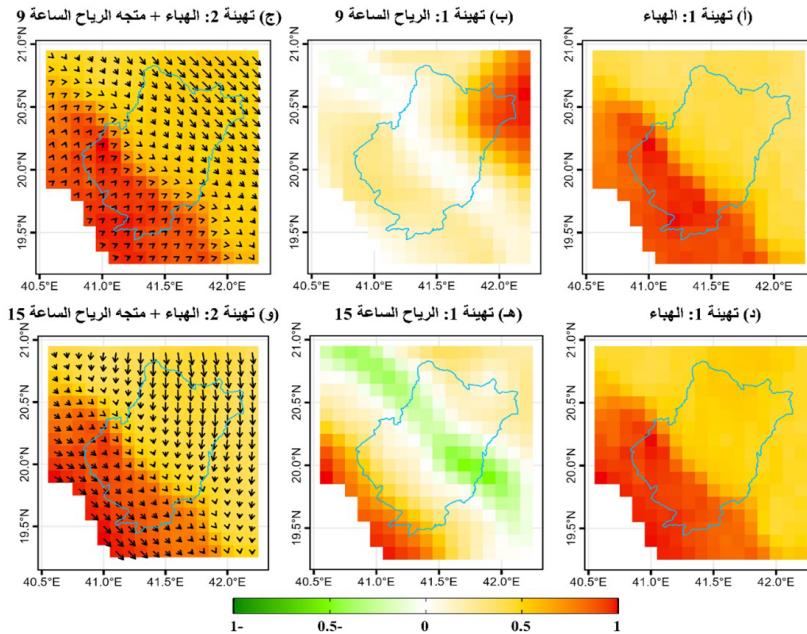
أنَّ التغيّر المشترك بين الرياح والهباء تحكمه آلية نقل سائدة على الأرجح. كما يدلُّ تفوق الصيغة الاتجاهية للرياح على أنَّ اتجاه التدفق الهوائي ومساراته المتماسكة يمثلان عاملَ تحكّمٍ مهماً في أنماط الهباء الجوي مقارنةً بسرعة الرياح وحدها. هذه النتائج تتوافق مع ما أشار إليه Rahman وآخرون (2024) من أنَّ سرعة الرياح تُظهر ارتباطاً متوسطاً بنشاط أحمال العوالق الجوية في المملكة؛ إذ تميل أحمال الهباء الجوي إلى الارتفاع مع زيادة سرعة الرياح حتى حدود معيّنة، قبل أن يتجّه لاحقاً نحو الاستقرار أو التراجع عند سرعة أعلى. ويمكن تفسير ذلك بأنَّ سرعة الرياح المتوسطة تكون غالباً أكثر فاعلية في إثارة العوالق والأترربة وإعادة تعليقها؛ ومن ثمَّ زيادة تركيز الهباء الجوي في الغلاف الجوي. غير أنَّ استمرار ارتفاع السرعة إلى مستوياتٍ أكبر قد يُفضي إلى تغيّرٍ في ديناميكية الغلاف الجوي؛ بحيث تصبح عملية التشتت والخلط الرأسي والنقل أكثر قوة؛ ما يُؤدّي إلى توزيع الجسيمات رأسياً وأفقيّاً، وقد يصاحب ذلك أيضاً انتقالها لمسافاتٍ بعيدة عن منطقة الرصد؛ الأمر الذي يفسّر طبيعة الارتباط المتوسط بين المتغيّرين بدلاً من ارتباطٍ خطي مُطرّد.

يعرضُ شكل 7 التوزيعات المكانية المستخلصة من تحليل التغير الأقصى للنمط/الوضع الثنائي الأول (Mode-1) خلال الفترة الصباحية وبعد الظهر دون الفترة الليلية؛ نظراً لانخفاض القوة التفسيرية نسبياً مقارنةً بالفترتين السابقتين. ويلاحظ بشكل عام من نتائج الشكل أنَّ النمط الثنائي في تحليل التغير الأقصى يتوافق مكانياً مع النمط الموسمي المهيمن المستنتج من تحليل المكونات الرئيسية؛ مما يُعزّز الاتساق بين نتائج التحليلين ويُبيّن أن هذا النمط يعكس أهمية الإشارة المناخية الموسمية السائدة على المستوى الإقليمي. وتجدر الإشارة إلى أنَّ خرائط هذا التحليل تُقرأ بوصفها بصمةً مكانية للنمط الثنائي محل الاهتمام لا كقيم فعلية؛ فهي لا تعرض مقدار أحمال الهباء أو سرعة الرياح بشكلها المطلق، وإنّما تُبرز أين يظهر النمط بأوضح صورة عبر الزمن؛ حيث تُظهر القيم المرتفعة -موجبة كانت أم سالبة- قوة انتماء الموقع للنمط وشدة تمثيله. في التهيئة الأولى للفترة الصباحية التي تربط بين الهباء الجوي وسرعة الرياح، تُظهر خرائط الأحمال المكانية أنَّ بصمة النمط الثنائي الأول للهباء تتركّز بوضوح في النطاق الغربي من منطقة الدراسة، كما في شكل 7-أ؛ ممّا يبيّن أنَّ هذا الجزء يمثل منطقة رئيسة تحدث فيها تقلبات الهباء الجوي الشهرية بقوة خلال الصباح؛ أي أنّه يمثل ما يمكن وصفه ببصمة استجابة للهباء الجوي مهمة/رئيسة. ويُلاحظ كذلك،

أنَّ هذا النطاق الغربي يظهر بإشاراتٍ موجبة قوية في مكون الهباء (شكل 7-أ)، في حين يظهر مكون سرعة الرياح الصباحية في الجزء نفسه بإشارة موجبة كذلك، ولكن أضعف نسبياً (شكل 7-ب). في المقابل؛ نلاحظ مشاهد معاكسة على الأجزاء الشرقية الشمالية التي تسجل إشارات موجبة منخفضة في مكون الهباء (شكل 7-أ) مع إشارات موجبة كذلك في مكون سرعة الرياح الصباحية، ولكن أقوى (شكل 7-ب). هذه المشاهد -بوجه عام- تشير إلى أنَّ اقتران سرعة الرياح والهباء الجوي ليس على مستوى محلي/موضعي بشكلٍ كامل؛ ما يعني أنَّ أقوى استجابة لتركيز الهباء الجوي لا تحدث بالضرورة في المواقع التي تكون فيها إشارة سرعة الرياح أقوى ما يمكن. وهذا يشير بعبارة أخرى إلى أنَّ سرعة الرياح ذات تأثيرٍ متوسط وغير خطي في نشاط الهباء خلال الفترة الصباحية، وهذا ما يتفق مع تحليل الارتباط للسلاسل الزمنية سابقاً.

شكل 7

التوزيع المكاني للنمط الثنائي الأول (Mode-1) الناتج من تحليل التغيرات الأقصى بين الهباء الجوي وسرعة الرياح عند الساعة 9 صباحاً (أ، ب) والساعة 15 مساءً (د، هـ)، وكذلك بين الهباء الجوي واتجاه الرياح عند الساعة 9 صباحاً (ج)، والساعة 15 مساءً (و)



أمّا في التهيئة الثانية التي تربطُ بين الهباء واتجاه الرياح في الفترة الصباحية؛ فيعرضُ شكل 7-ج النمط المكاني للهباء بجانب متجهات الرياح، بوصفها النمط الاتجاهي المصاحب. وتبرز أهمية هذه الصيغة في أنّها لا تكتفي بإظهار أنماط تركُّز الهباء، بل تُظهر أيضاً مسار النقل واتجاه التدفق الهوائي المصاحب. وتدل الأسهم على اتجاه شذوذات الرياح (الانحراف عن المتوسط المناخي) وليس اتجاه الرياح الفعلي؛ أي: أنّها تصفُ كيف يميلُ اتجاه الرياح إلى الانزياح/الشذوذ عند نشاط نمط المكون محل النظر. فعندما تتجّه الأسهم نحو الجنوب الشرقي مثلاً، فهذا يعني أنّ الانحرافَ يعادل رياحاً قادمة من الشمال الغربي؛ أي: أنّ التدفقَ الهوائي يميلُ أكثر إلى القدوم من الشمال الغربي من المعتاد (المتوسط المناخي). وعليه؛ فإنّ النتائج تشير إلى أنّ الأشهر التي تشهدُ انحرافاتٍ موجبة في الهباء الجوي فوق الأجزاء الجنوبية الغربية تتزامنُ عادةً مع ميل الرياح الصباحية إلى الانحراف نحو الشمال الشرقي، في حين تميلُ الرياح إلى الانحراف نحو الجنوب الشرقي على الأجزاء الشرقية وبسرعاتٍ أعلى؛ وبذلك يمكن الربط بين مكوني التهيئة الأولى ومكوني التهيئة الثانية ضمن تفسيرٍ مكاني مترابط، يوضح أنّ الأجزاء الغربية من المنطقة تكون فيها أحمال الهباء ذات بصمة مكانية قوية، يتوافقُ معها في الفترة الصباحية نمطٌ متوسطٌ لسرعة الرياح، بجانب وجود اتجاه نقلٍ هوائي متماسك يندفع نحو الأجزاء الشرقية. وهذا يوضّح كيف يمكن للرياح -باتجاهها لا بشدتها فقط- أن تسهم في إعادة توزيع أحمال الهباء الجوي مكانياً.

وعند الانتقال إلى فترة بعد الظهيرة (شكل 7-د، هـ)، يظل نمطُ الهباء محافظاً على سمته العامة المتمثلة في تمركزٍ أقوى في القطاع الغربي؛ بما يشيرُ إلى ثباتٍ نسبي في منطقة استجابة الهباء ضمن النمط الثنائي الرئيس الأول خلال النهار. غير أنّ السمة الفارقة في فترة بعد الظهيرة تتضحُ في الأجزاء الشرقية من منطقة المرتفعات؛ إذ تبرزُ على خريطة مكوّن سرعة الرياح أحمال مكانية سلبية (شكل 7-هـ)، في حين تقابلها أحمال مكانية موجبة على خريطة مكوّن الهباء. هذا السلوكُ يبين أنّ الرياحَ تميلُ إلى أن تكونَ أبطأ من المعتاد فوق هذه الأجزاء؛ مما يقودُ إلى انخفاض عمليات التهوية؛ ومن ثم، يُؤدّي إلى تراكم الهباء الجوي. ومع ذلك، تظل أقوى إشارات العُمق البصري للهباء الجوي متمركزة فوق الجهات الغربية، وهذا ما يرجح أن يُظهر هذا النمط نظامَ دورانٍ جوي إقليمياً يحدثُ فيه ضعفٌ للرياح على الأجزاء الشرقية من منطقة المرتفعات، بالتزامن مع زيادة الهباء الجوي ونشاطٍ للرياح على الجهات الغربية (منطقة الاستجابة الرئيسة)، بدلاً من إشارة تراكم محلية مباشرة.

بالانتقال إلى التهيئة الثانية في فترة بعد الظهر، كما في شكل 7-و، يلاحظ أنَّ شدة النمط المكاني للهباء لا تزال تتركز على القطاع الغربي، مع تدرج نحو إشارات أضعف باتجاه الشرق والشمال الشرقي؛ بما يدعم استمرار القطاع الغربي كمنطقة استجابة رئيسة للهباء ضمن نمط بعد الظهر. وفي الوقت نفسه؛ تكشفُ متجهات الرياح عن بنية اتجاهية متماسكة لانحرافات الرياح المصاحبة؛ إذ يتجه التدفق الهوائي نحو الجنوب على الأجزاء الشرقية، في حين تميلُ الرياح في الأجزاء الغربية إلى الانحراف باتجاه الجنوب الغربي (رياح قادمة من الشمال الغربي) مع توافقٍ إيجابي مع إشارة الهباء على هذه الأجزاء. وتبرز أهمية هذه النتيجة في أنَّ التهيئة المتجهة للرياح لا تُظهر أين تتركز استجابة الهباء فقط، بل تُوضِّح أيضاً اتجاه النقل الممكن المرتبط بالنمط. هذا بدوره يبين أنَّ الهباء بعد الظهر -يرتبط على الأرجح- بانزياح اتجاهي (شذوذ عن المتوسط المناخي) في التدفق الهوائي نحو الجنوب الغربي؛ وبذلك تُقدِّم هذه التهيئة إطاراً تفسيرياً أوضح من تهيئة السرعة وحدها؛ لأنَّها تُبيِّن أنَّ جزءاً مهماً من علاقة الرياح بالهباء في هذه الفترة يكون مرتبطاً بمسار النقل واتجاهه، وليس بشدة الرياح المحلية فقط.

بوجه عام؛ تشيرُ نتائج تحليل التباين الأقصى إلى أنَّ اقترانَ الرياح والهباء الجوي يسودُ فيه نطاقٌ ثابتٌ للهباء الجوي، متمركزٌ على القطاع الغربي من المنطقة، بينما تظهر إشارة الرياح المصاحبة له بدرجةٍ أكبر من خلال مسارات تدفق الهواء على مستوى المنطقة بدلاً من تغيّرات الرياح في المواقع نفسها. يدعم استمرار ظهور منطقة الاستجابة للهباء الجوي عبر كل التهيئات (Configurations)، إلى جانب البنية الديناميكية الهوائية التي تكون أكثر وضوحاً عند التعامل مع اتجاه الرياح، التفسير بأنَّ الأحمال الشهرية للهباء الجوي في هذه المنطقة تتأثر بشدة بأنظمة نقلٍ هوائي متماسكة. على وجه الخصوص، يشير استمرار منطقة استجابة الهباء الجوي نفسها عبر التهيئات المختلفة إلى وجود مركز ثقل مكاني قوي (Hotspot) وذي دلالة ديناميكية لتغيرات الهباء الجوي؛ ممَّا يُعطي انطباعاً عن كون هذه البؤرة مصدراً مهماً، أو منطقة تراكم ضمن نظام النقل الهوائي السائد، وهذا ما يتفقُ مع الطبيعة الجغرافية السهلية لهذه المنطقة ويعضدُ النتائج السابقة.

الخاتمة والتوصيات

كشفت نتائج المكونات الرئيسية أنَّ هناك ثلاثة أنماط مكانية سائدة للهباء الجوي في منطقة الباحة؛ إذ يمثل المكون الرئيسي الأول النمط العام، الذي يمثل الدورة السنوية

المناخية العامة للهباء الجوي في المنطقة. في المقابل؛ يشير المكون الرئيسي الثاني إلى الفروقات الإقليمية الداخلية، ويظهر أنَّ هناك نطاقين جغرافيين متعاكسين في موسمية نشاط الهباء الجوي، وهما: النطاق الغربي، والنطاق الشرقي. أمَّا المكون الرئيسي الثالث؛ فيوضُّ تفاصيل أدق تتعلق بالمناطق الجبلية الوسطى، والتي تشكل منطقة انتقالية بين النطاق الشرقي والغربي. كما دلت النتائج على أهمية التضاريس الجبلية في توزيعات الهباء الجوي، من خلال تشكيل المرتفعات حداً تضاريسياً فاصلاً لتوزيع الهباء الجوي بين الجهتين الغربية والشرقية من المنطقة. وعند ربط هذه النتائج مع النشاط الموسمي للرياح كان من الواضح أنَّ اتجاه الرياح يُسهم في تفسير السلوك الموسمي للهباء الجوي بشكل أكبر من سرعة الرياح وحدها، مع أهمية الدورة الجوية اليومية لنسيم البحر.

تشكل هذه النتائج مجتمعةً إضافة علمية نوعية تُميّز هذه الدراسة عن سابقتها التي أشارت إلى صيفية موسم الغبار في المناطق الجنوبية الغربية للمملكة على مستوى إقليمي عام دون تقديم توصيف دقيق للفروقات المحلية في توزُّع الغبار زمانياً ومكانياً (Ali & Assiri, 2019; Ali et al., 2017; Rahman et al., 2024). وقد أتاح تحليل المكونات الرئيسية رسم وفصل التباين بين الأجزاء الشرقية والغربية مع كشف السلوك الزمني المميّز للهباء في القطاع الأوسط. كما تميّزت الدراسة بمقارنة تأثير سرعة الرياح مع اتجاه الرياح؛ وقد أشارت النتائج إلى دور أكثر بروزاً لاتجاه الرياح في تفسير الأنماط المرصودة للهباء، كذلك بيّنت النتائج أهمية إدراج التباين اليومي في خصائص الرياح؛ لتعزيز قدرات تفسير السلوك الزمني للهباء بصورة أكثر شمولاً، وهذا جانب لم يحظَ بقدر كافٍ في كثيرٍ من الدراسات السابقة.

ترتبط هذه النتائج بإمكاناتٍ تطبيقية متعدّدة قابلة للتوظيف في مجالاتٍ متعدّدة، تُسهم في تحسين فائدة التنبؤات الجوية ودعم إستراتيجيات إدارة جودة الهواء، والتخفيف من الآثار الصحيّة والبيئية المرتبطة بالهباء الجوي؛ مثل: الاستفادة من أنماط العلاقة بين ديناميكيات الرياح والتضاريس في تطوير نماذج أكثر دقة للإنذار المبكر بالحالات الغبارية على المستوى الإقليمي للمنطقة. كما يمكن توظيف النتائج في تعزيز التخطيط الصحي والبيئي الاستباقي خلال الأشهر التي تزداد فيها احتمالية تدهور جودة الهواء من خلال استهداف المناطق الأكثر عرضة للتأثر بالعواقل الغبارية عبر استثمار هذه المعطيات في بناء خطط صحية محلية للحد من التعرض، بما يعزز من فعالية الإستراتيجيات الوقائية خصوصاً في المواقع والفترات ذات

الخطورة العالية. ومن ناحية أخرى؛ فإنَّ النتائجُ تساعدُ في تحسين توجيه جهود الرصد والمتابعة نحو المواقع الأكثر نشاطاً وحساسية؛ مما يسهم في تصميم سياسات بيئية موجهة مكانياً بناءً على المناطق الأكثر تأثراً، إضافة إلى رفع كفاءة الرصد والمراقبة البيئية من خلال دمج الأنماط المكانية للهباء الجوي ضمن برامج المراقبة؛ بما يسهم في تحسين تتبع مصادر الغبار وتطوره.

على الرغم من المساهمة التي تُقدِّمها هذه الدراسة، فإنَّها تخضع لعدد من القيود التي يُوصى بمراعاتها في الدراسات المستقبلية. فقد أشارت النتائج إلى وجود مسارات نقلٍ هوائي ومصادر إمدادٍ محتملة للهباء الجوي تعذّر تتبّعها بشكل مفصل؛ نظراً لطبيعة أهداف الدراسة والبيانات المتاحة؛ ممّا يتطلب إجراء مزيد من الدراسة عبر تطبيق نماذج تحليل المسارات (Trajectory Analysis) لتتبع حركة الهواء ومساراته وتحديد مناطق المصدر المحتملة؛ بما يساعد على التمييز بين مساهمة النقل من المناطق المجاورة وتأثيرات المصادر المحلية داخل منطقة الباحة. وفي هذا السياق؛ تبرز أهمية إجراء دراسات حالة لأحداث الهباء الشديدة وربطها بالأنماط الجوية السائدة (Synoptic Patterns)؛ لفهم آليات إثارة العوالق ونقلها خلال الحالات المتطرفة. في المقابل؛ اعتمدت هذه الدراسة على العمق البصري للهباء الجوي، بوصفه من المؤشرات الشائعة لتمثيل الحمل الكلي للهباء وتباينه المكاني والزمني، وهو ما قيّد التمييز بين أنواع الهباء؛ مثل: الغبار، والملح البحري، والدخان؛ ممّا يتطلب دراساتٍ مستقبلية توظف مؤشرات إضافية لتحديد أنواع الهباء السائدة وتبايناتها. كما يتضح من النتائج أهمية التباين اليومي في الرياح السطحية؛ الأمر الذي يقترح دمج متغيراتٍ إضافية مرتبطة ببنية الغلاف الجوي السفلي؛ مثل: ارتفاع طبقة الحدّ الجوية، والاستقرار الحراري، لفهم دور الخلط الرأسي في تحويل تأثير الرياح السطحية إلى تغيّرات في العمود الهوائي. كما أنّه يُقترح تبني إطار تحليلٍ موسّع في الأعمال المستقبلية بإدراج متغيرات جوية إضافية؛ كالرطوبة النسبية، والهطول، ودرجة الحرارة أو متغيرات سطحية أخرى؛ كالغطاء النباتي، ورطوبة التربة، وخصائص التربة؛ مما يسهم في تفسيرٍ أشمل للعوامل المسيطرة على الخصائص المكانية والزمانية للهباء.

المراجع

القحطاني، جواهر مفرح، والمطيري، دلال محمد، وبادخن، محمد. (2025). تحليل حالات العواصف الغبارية الأبرز في شهر أبريل 2024 على المملكة العربية السعودية. *المجلة العربية للدراسات الجغرافية*، 8(24)، 327-348. <https://doi.org/10.21608/jasg.2025.443042>

- Albugami, S., Palmer, S., Cinnamon, J., & Meersmans, J. (2019). Spatial and temporal variations in the incidence of dust storms in Saudi Arabia revealed from in situ observations. *Geosciences*, 9(4), 162. <https://doi.org/10.3390/geosciences9040162>
- Al-Huqail, A. A., & Islam, Z. (2025). Ecological stress assessment on vegetation in the Al-Baha Highlands, Saudi Arabia (1991–2023). *Sustainability*, 17(7), 2854. <https://doi.org/10.3390/su17072854>
- Ali, M. A., & Assiri, M. (2019). Analysis of AOD from MODIS-merged DT–DB products over the Arabian Peninsula. *Earth Systems and Environment*, 3(3), 625–636. <https://doi.org/10.1007/s41748-019-00108-x>
- Ali, M. A., Assiri, M., & Dambul, R. (2017). Seasonal aerosol optical depth (AOD) variability using satellite data and its comparison over Saudi Arabia for the period 2002–2013. *Aerosol and Air Quality Research*, 17(5), 1267–1280. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2016.11.0492>
- Alsubhi, Y., Qureshi, S., Assiri, M. E., & Siddiqui, M. H. (2022). Quantifying the impact of dust sources on urban physical growth and vegetation status: A case study of Saudi Arabia. *Remote Sensing*, 14(22), 5701. <https://doi.org/10.3390/rs14225701>
- An, S. I. (2003). Conditional maximum covariance analysis and its application to the tropical Indian Ocean SST and surface wind stress anomalies. *Journal of Climate*, 16(17), 2932–2938. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<2932:CMCAA1>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<2932:CMCAA1>2.0.CO;2)
- Anisimov, A., Tao, W., Stenchikov, G., Kalenderski, S., Prakash, P. J., Yang, Z. L., & Shi, M. (2017). Quantifying local-scale dust emission from the Arabian Red Sea coastal plain. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(2), 993–1015. <https://doi.org/10.5194/acp-17-993-2017>, 2017
- Bai, K., Li, K., Shao, L., Li, X., Liu, C., Li, Z., Ma, M., Han, D., Sun, Y., Zheng, Z., Li, R., Chang, N., & Guo, J. (2024). LGHAP v2: A global gap-free aerosol optical depth and PM_{2.5} concentration datasets since 2000 derived via big Earth data analytics, *Earth Syst. Sci. Data*, 16(5), 2425–2448. <https://doi.org/10.5194/essd-16-2425-2024>.
- Banks, J. R., Brindley, H. E., Stenchikov, G., & Schepanski, K. (2017). Satellite retrievals of dust aerosol over the Red Sea and the Persian Gulf (2005–2015). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(6), 3987–4003. <https://doi.org/10.5194/acp-17-3987-2017>, 2017
- Deng, S., Jian, Z., Liu, Y., Yi, C., Chen, Y., & Zhang, W. (2023). Tracking low-frequency variations in land–sea water mass redistribution during the GRACE/GRACE-FO Era. *Remote Sensing*, 15(17), 4248. <https://doi.org/10.3390/rs15174248>

- Farahat, A., El-Askary, H., & Al-Shaibani, A. (2015). Study of aerosols' characteristics and dynamics over the Kingdom of Saudi Arabia using a multisensory approach combined with ground observations. *Advances in Meteorology*, 2015(1), 247531. <https://doi.org/10.1155/2015/247531>
- Kalenderski, S., & Stenchikov, G. (2016). High-resolution regional modeling of summertime transport and impact of African dust over the Red Sea and Arabian Peninsula. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(11), 6435–6458. <https://doi.org/10.1002/2015JD024480>
- Kunchala, R. K., Attada, R., Karumuri, R. K., Seelanki, V., Singh, B. B., Ashok, K., & Hoteit, I. (2024). Climatology, trends, and future projections of aerosol optical depth over the Middle East and North Africa region in CMIP6 models. *Frontiers in Climate*, 6, 1384202. <https://doi.org/10.3389/fclim.2024.1384202>
- Labban, A. H., & Butt, M. J. (2023). Evaluation of MERRA-2 data for aerosols patterns over the Kingdom of Saudi Arabia. *Heliyon*, 9(6). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17047>
- Notaro, M., Alkolibi, F., Fadda, E., & Bakhrijy, F. (2013). Trajectory analysis of Saudi Arabian dust storms. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(12), 6028–6043. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50346>
- Notaro, M., Yu, Y., & Kalashnikova, O. V. (2015). Regime shift in Arabian dust activity, triggered by persistent Fertile Crescent drought. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(19), 10–229. <https://doi.org/10.1002/2015JD023855>
- Parajuli, S. P., Stenchikov, G. L., Ukhov, A., Mostamandi, S., Kucera, P. A., Axisa, D., Gustafson, W. I., Jr., & Zhu, Y. (2022). Effect of dust on rainfall over the Red Sea coast based on WRF-Chem model simulations. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 22(13), 8659–8682. <https://doi.org/10.5194/acp-22-8659-2022>
- Prakash, P. J., Stenchikov, G., Kalenderski, S., Osipov, S., & Bangalath, H. (2015). The impact of dust storms on the Arabian Peninsula and the Red Sea. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(1), 199–222. <https://doi.org/10.5194/acp-15-199-2015>
- Rahman, M. M., Shults, R., Hasan, M. G., Arshad, A., Alsubhi, Y. H., & Alsubhi, A. S. (2024). Exploring the trends of aerosol optical depth and its relationship with climate variables over Saudi Arabia. *Earth Systems and Environment*, 8(4), 1247–1265. <https://doi.org/10.1007/s41748-024-00452-7>
- Tariq, S., Shahzad, H., Mehmood, U., & ul-Haq, Z. (2023). Summertime variability of aerosols and covariates over Saudi Arabia using remote sensing. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 16(2), 327–340. <https://doi.org/10.1007/s11869-022-01276-y>

- Xue, Y., Diallo, I., Li, W., David Neelin, J., Chu, P. C., Vasic, R., Guo, W., Li, Q., Robinson, D. A., Zhu, Y., Fu, C., & Oaida, C. M. (2018). Spring land surface and subsurface temperature anomalies and subsequent downstream late spring-summer droughts/floods in North America and East Asia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(10), 5001–5019. <https://doi.org/10.1029/2017JD028246>
- Yu, Y., Notaro, M., Liu, Z., Kalashnikova, O., Alkolibi, F., Fadda, E., & Bakhrjy, F. (2013). Assessing temporal and spatial variations in atmospheric dust over Saudi Arabia through satellite, radiometric, and station data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(23), 13–253. <https://doi.org/10.1002/2013JD020677>
- Zhang, Z., Su, B., Chen, Y., Lan, J., Bilal, M., Pan, M., Ilyas, S., & Khedher, K. M. (2022). Study on vertically distributed aerosol optical characteristics over Saudi Arabia using CALIPSO satellite data. *Applied Sciences*, 12(2), 603. <https://doi.org/10.3390/app12020603>

د. علي بن سعيد الغامدي، أستاذ علم المناخ والتخطيط البيئي المشارك في قسم الجغرافيا بجامعة الملك سعود، الرياض، المملكة العربية السعودية. دكتوراه في الجغرافيا من جامعة كانساس الحكومية، الولايات المتحدة الأمريكية، عام 2018. ودرجة الماجستير في الجغرافيا والتخطيط البيئي من جامعة تاوسن، الولايات المتحدة الأمريكية، 2014. الاهتمامات البحثية: المناخ الإقليمي والمدني، التلوث الهوائي، التخطيط البيئي والمناخي، المخاطر المناخية، الاستشعار عن بعد البيئي، الحوسبة المكانية.

aorifi@ksu.edu.sa