تأثيرات العواصف الترابية على البنية التحتية للطرق في الصحراء الغربية (مصر): تقييم ساعي بالاعتماد على الذكاء الاصطناعي

اعداد/ اسلام محمد جابر

باحث دكتوراه- خبير نظم معلومات جغرافية- وزارة البيئة والمياه والزراعة السعودية
Islammohamed1606@gmail.com
أ.د/ عبدالرازق بسيوني الكومي

أستاذ الجغرافيا الطبيعية- وكيل شئون الدراسات العليا- كلية الآداب- جامعة طنطا

Abdelrazek.elkoumi@art.tanta.edu.eg

الملخص: تعد العواصف الغبارية من أهم الظواهر الجوية المرتبطة بمناخات الصحراء، حيث تؤثر على الصحة والنقل والتنمية المستدامة. يحلل هذا البحث خصائص العواصف الغبارية في الصحراء الغربية بمصر من عام 2003 إلى عام 2023 باستخدام نهج تقييم الأثر المحتمل للطرق.

يستخدم البحث بيانات إعادة تحليل CAMS ADS التي تتضمن تركيز الغبار وعمق الهباء الجوي البصري ونسبة جزيئات الغبار الخشن المُصدرة بصيغة NetCDF. تمت معالجة البيانات باستخدام مكتبات Python (xarray و dask و geopandas و pandas) وتطبيقات نظم المعلومات الجغرافية المتقدمة ArcGIS Pro و Google Earth Engine. يتضمن النهج تصدير البيانات المتعلقة بالغبار إلى شبكة نقطية مكانية ودمجها جغرافيًا وزمنيًا مع متغيرات مؤشر الغبار التي تمتلك دقة زمنية مدتها 3 ساعات، ثم إنشاء تقييمات زمنية ومكانية متوقعة على شبكة طرق متجهة مُصدرة بصيغة GeoPackage و Parquet مما يسمح بمزيد من الكفاءة في التنفيذ والتقييم. تكشف النتائج أن أعلى معدل لعواصف الغبار يحدث خلال شهري أبريل ومايو، حيث يتجاوز التعرض المتراكم على طول أجزاء مختارة من الطرق على مر السنين 3500 ساعة تمثل ما يقرب من 180 ساعة في السنة (7-8 أيام من التداخل). تتراكم المناطق عالية الخطورة على طول طريق الداخلة - الخارجة - الفرافرة - البحرية، وطريق الخارجة - أسيوط - أبو طرطور، وأي طرق متجهة جنوبًا إلى شرق العوينات/الحدود السودانية حيث يحدث تداخل عالي الخطورة. ومع ذلك، فإن الشمال بالقرب من الطريق الساحلي (السلوم، سيدي براني) يتلقى عواصف الغبار في الغالب في فصل الشتاء، بينما يتلقى الصيف تعرضًا أقل نسبيًا (يوليو - أغسطس). تشير هذه النتائج إلى أهمية مخاطر الزمان والمكان لإمكانية التنبؤ بعواصف الغبار بناءً على الموسمية والوقت من اليوم. تظهر معظم الطرق عواصف الغبار بشكل رئيسي عندما تكون العواصف الغبارية سائدة في الساعة 06:00 و12:00 و18:00، مما يشير إلى أن النشاط النهاري مرتفع أيضًا. يؤكد هذا على ضرورة وجود نظام تحذير بري للصحراء الغربية، على الأقل للطرق المؤدية إليها. كما ينبغي أن تعتمد تحذيرات الطرق خطة امتثال تعتمد على الموسم والوقت من اليوم. يُبرز هذا البحث أهمية تقييمات الاستشعار عن بُعد التأكيدية، والمعالجة والتحليل الجغرافي المكاني، وبيانات المناخ العالمي، لإجراء تقييم شامل لمخاطر العواصف الغبارية للتكيف مع الظروف الجوية القاسية.

الكلمات المفتاحية: العواصف الغبارية؛ الصحراء الغربية؛ جودة الهواء؛ شبكات الطرق؛ CAMS ADS؛ التحليل المكاني؛PM10 ؛ الغبار الخشن ؛ العمق البصري للغبار(AOD) .

Impacts of Dust Storms on Road Infrastructure in the Western Desert (Egypt): Hourly Assessment Using Artificial Intelligence

Abstract: Dust storms are one of the most significant weather events associated with desert climates, impacting health, transport, and sustainable development. This research analyzes the characteristics of dust storms in the Western Desert of Egypt from 2003 to 2023 with the potential impact assessment approach for roads. The research utilizes CAMS ADS reanalysis data which include dust concentration, aerosol optical depth, and coarse dust percentage of particles exported as NetCDF. Processing of the data occurred with Python libraries (xarray, dask, geopandas, pandas) and advanced Geographic Information Systems applications like ArcGIS Pro, Google Earth Engine. The approach includes exporting dust-related data into a spatial raster grid and integrating it geographically and temporally with dust index variables possessing a 3-hour temporal resolution, then creating time and space assessments projected on a vector road network export as GeoPackage and Parquet allowing further efficient realization and evaluation. Findings reveal that the highest incidence of dust storms occurs during the months of April and May, with exposure accumulated along select road segments over the years exceeding 3500 hours representing nearly 180 hours a year (7-8 days of interference). High-risk areas accumulate along the Dakhla - Kharga - Farafra - Bahariya road, the Kharga - Asyut - Abu Tartour road, and any roads going south to East Owainat/Sudanese border as high-risk interference happens. However, the north near the coastal road (Sallum, Sidi Barani) receives dust storms mostly in winter, while summer receives relatively less exposure (July - August). These results indicate time and space risk relevance to dust storms predictability based on seasonality and time of day. Most roads exhibit dust storms mainly when dust storms are prevalent at 06:00, 12:00, and 18:00, indicating day activity is also high. This emphasizes an overland warning system demand for the Western Desert, at least for access roads. Road warnings should also adopt a season and time of day-based compliance plan. This research highlights the value of remote-sensing confirmatory assessments, geospatial processing and analysis, and global climate data for comprehensive dust storm risk assessment for adaptation against extreme weather conditions.

Keywords: Dust storms; Western Desert; Air quality; Road networks; CAMS ADS; Spatial analysis; PM10; dust bins; Aerosol Optical Depth (AOD).

أولاً: المقدمة:

تشكل العواصف الترابية ظاهرة جوية ذات تأثير واسع النطاق في المناطق الصحراوية، حيث تساهم في نقل الجسيمات الدقيقة لمسافات طويلة، مما يُعزز مستويات التلوث الجوي ويؤثر سلبًا على المناخ والصحة العامة. وتشير نماذج بيئية عالمية إلى أن شمال أفريقيا يُعد مصدرًا رئيسيًا للغبار المعدني، حيث يتراوح المعدل السنوي للانبعاثات بين **400و2200 تيراغرام سنويًا** (Prospero et al., 2014).

من منظور صحي، تم رصد تأثيرات مباشرة لجسيمات الغبار على الإنسان، حيث أظهرت مراجعة شاملة وجود روابط ذات دلالة إحصائية بين التعرض للعواصف الترابية وزيادة الوفيات والإصابات التنفسية والقلبية (Lwin,2023).

في السياق البيئي، أظهرت الدراسات أن **الانخفاض الحاد في الرؤية الأفقية أثناء العواصف الترابية** يؤدي إلى **ارتفاع ملحوظ في حوادث النقل** في العديد من المناطق. فعلى سبيل المثال، لاحظت هيئة NOAAأن العواصف الترابية يمكن أن تُصعّب على السائقين إبصار الطريق تمامًا أمامهم وخلفهم، مما يؤدي إلى فقدان السيطرة وحوادث اصطدام متتالية في ظروف يُرصد فيها تدهور الرؤية بشكل شديد.(Tong et al., 2023)

تظهر هذه الظواهر فجوة علمية كبيرة في فهمها وتقييمها داخل **مصر، ممثلةً في الصحراء الغربية،** التي تُعد شبكة طرقها الصحراوية عرضة بشكل خاص لهذه المخاطر الأكيدة. إذ تشكل هذه الممرات شرايين حيوية لربط الواحات بالوادي والدلتا، وتحتاج إلى تقييمات علمية دقيقة بخصوص مخاطر العواصف الغبارية عليها.

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل التوزيع الزمني والمكاني لمعدلات العواصف الغبارية في الصحراء الغربية خلال الفترة **2003–2023**، باستخدام بيانات إعادة التحليل (**CAMS ADS**) وتطبيق **عتبات كمية محددة** لتعريف "ساعات العاصفة الغبارية"، ثم إسقاط هذه البيانات على شبكة الطرق الرئيسية لتقييم مستويات الخطورة ودعم استراتيجيات التكيف المناخي والسلامة المرورية.

الدراسات السابقة:

تناولت العديد من الدراسات العربية والأجنبية موضوع العواصف الغبارية وتأثيراتها البيئية والصحية والمناخية، وكذلك علاقتها بعناصر المناخ وجودة الهواء وحركة النقل. فقد أجرى **الحسناوي (2015)** دراسة كمية ونوعية لغبار مدينة كربلاء، قيّم من خلالها تراكيز الغبار المتساقط وخصائصه الفيزيائية والكيميائية والحيوية، وكشف عن احتواء ذرات الغبار على عناصر ثقيلة خطرة وبعضها مجهرية ممرضة، كما اختبر قدرة سبعة أنواع نباتية على تحمل التلوث وتراكم الملوثات، وأوصى بإنشاء أحزمة خضراء للحد من التلوث.

وفي السياق نفسه، تناول **النافعي وآخرون (2022)** أثر تراكيز الهباء الجوي على انخفاض الإشعاع الشمسي الواصل إلى سطح الأرض في العراق، موضحين دوره في ظاهرة "التعتيم الشمسي" وتأثيره على الميزانية الإشعاعية للأرض وتكوين الغيوم. أما **الرحيلي (2024)** فقد ركز على التحليل المكاني للعواصف الغبارية ومخاطرها على حركة النقل في المملكة العربية السعودية باستخدام بيانات إعادة

التحليل (MERRA) وتقنياتGIS ، مبينًا أن مناطق شمال شرق المملكة والرياض تُعد من أكثر المناطق تعرضًا للمخاطر، وداعيًا إلى تبني استراتيجيات وقائية وإنذار مبكر.

من ناحية أخرى، قدمت الدراسات الأجنبية نماذج تحليلية متقدمة لانتقال وتوزيع الغبار. فقد استخدم **Jiawei & Zhiwei (2012)**نموذج RAQMS لدراسة التغيرات الموسمية للغبار في شرق آسيا، موضحين ارتفاع التركيزات في الربيع وانخفاضها في الصيف، وبيّنوا الأثر البشري على عبء الغبار الجوي. كما أشار **Prasad et al. (2010)**إلى انتقال الغبار بعيد المدى من الصحراء الغربية المصرية إلى دلتا النيل خلال موسم حرق الكتلة الحيوية، مؤكدين أن الغبار الصحراوي يُعد مساهمًا رئيسيًا في تلوث الهواء المحلي. وأوضحت دراسة **Fenhua & Guan (2018)**أن العمق البصري للغبار (AOD) يرتبط ارتباطًا وثيقًا بنظام الرياح الموسمية الآسيوية، مع ارتفاعه في شرق الصين خلال الربيع والصيف.
أما **Wang et al. (2020)**فقد استخدم نموذج GEOS-Chem لتحليل تأثير غبار الصحراء على جودة الهواء في أوروبا، موضحًا أن الغبار يساهم بنسبة كبيرة من الوفيات المرتبطة بجسيمات PM10 في دول جنوب أوروبا. وفي منطقة الشرق الأوسط، حلل **Awadh (2023)**أسباب تزايد العواصف الرملية والترابية باستخدام العراق كنموذج، وأرجع ذلك إلى ارتفاع درجات الحرارة وسوء استخدام الأراضي، واقترح التشجير وتقليل الانبعاثات كوسائل للتخفيف. بينما بحث **Dawoud et al. (2023)**التباين الزمني لتركيزات الجسيمات والكربون الأسود فوق القاهرة الكبرى، موضحًا زيادة تركيز الجسيمات في الشتاء وارتباطها بالأنماط الجوية المستقرة. وقد ركزت مجموعة من الدراسات على مناخ الصحراء الغربية وتأثير العواصف الرملية. فقد تناول **التلاوي (1983)** أثر المناخ على البيئة في الصحراء الغربية، مبينًا علاقته بالتضاريس والتربة والنبات والأنشطة البشرية، فيما حلل **سالم (2011)** التلاؤم الحراري في الإقليم لتحديد الحاجة إلى التبريد والتدفئة. كما تناول **مبروك (2021)**تأثير العواصف الرملية والترابية على النقل الجوي في مصر، مشيرًا إلى دورها في خفض الرؤية وتعطيل الرحلات الجوية. ودرس **عبدالله وطلبة (2021)** الظواهر المناخية المسببة لانخفاض الرؤية الأفقية وعلاقتها بالحوادث المرورية على الطرق السريعة، مؤكدين ارتباطها بالعواصف الرملية وزحف الرمال على الطرق.

وبذلك، تُبرز هذه الدراسات أهمية تحليل العواصف الترابية والغبارية في المناطق الجافة وشبه الجافة، لما تسببه من آثار بيئية وصحية واقتصادية، وتُظهر الحاجة إلى تقييمات مكانية وزمانية دقيقة باستخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي لفهم أنماطها ومخاطرها على البنية التحتية والنقل.

مشكلة الدراسة:

تعد العواصف الترابية من أبرز الظواهر المناخية التي تؤثر سلبًا على البنية التحتية للطرق في البيئات الجافة وشبه الجافة، نظرًا لما تسببه من تآكل للأسطح، وتراكم للرمال، وضعف في كفاءة الرؤية وسلامة الحركة المرورية. ورغم تعدد الدراسات التي تناولت الغبار في الصحراء الكبرى وشمال إفريقيا، إلا أن **الصحراء الغربية المصرية** لم تحظَ بدراسة منهجية تربط بين **التحليل الزمني الساعي للعواصف الترابية** وتأثيراتها الفعلية على الطرق باستخدام **أدوات الذكاء الاصطناعي.**

أسباب اختيار الموضوع:

1. **الأهمية العلمية** في تحليل العلاقة بين الغبارو البنية التحتية لشبكة الطرق.
2. **البعد التطبيقي** في دعم قرارات صيانة الطرق والحد من مخاطر تراكم الرمال وتدهور الأسطح.
3. **الحاجة إلى التحليل الزمني الساعي** لرصد التغيرات السريعة المصاحبة للعواصف لتحديد افضل ساعات اليوم أو النهار والليل للحركة الطبيعية للسائقين.
4. **أهمية إدماج أدوات التنبؤ والذكاء الاصطناعي** في الدراسات المناخية والبيئية التطبيقية لتحليل البيانات الضخمة خلال أوقات قياسية.

أهمية الدراسة:

1. **أهمية علمية:**
   - تعد أول دراسة تقدم تقييمًا ساعيًا لتأثيرات العواصف الترابية على الطرق في الصحراء الغربية المصرية.
   - توظّف بيانات متعددة المصادرCAMS ، MODISوتحللها مكانيًا وزمانيًا بدقة عالية.
   - تدمج بين الاستشعار عن بعد، ونظم المعلومات الجغرافية، والذكاء الاصطناعي.
2. **أهمية تطبيقية:**
   - توفر نتائج قابلة للتطبيق في **الإنذار المبكر وصيانة الطرق** وتخطيط شبكات النقل.
   - تسهم في دعم استراتيجيات **إدارة المخاطر البيئية** وتقليل الحوادث الناتجة عن ضعف الرؤية وزحف الرمال.
   - تساعد في تحديد **المناطق الأكثر تعرضًا للمخاطر** لتوجيه الاستثمارات في الحماية والصيانة.

أهداف الدراسة:

1. تحليل **الأنماط الزمنية الساعية** للعواصف الترابية في الصحراء الغربية خلال ساعات اليوم وساعات الليل والنهار.
2. تحديد **التوزيع المكاني** لمناطق التأثير المرتفع والمنخفض على شبكة الطرق.
3. تقييم العلاقة بين **شدة العواصف** وتدهور الطرق أو إغلاقها.
4. تقديم **خريطة مخاطر** توضح أولويات التدخل والصيانة في الطرق المتأثرة.

أسئلة الدراسة:

1. ما مدى التباين الزمني الساعي للعواصف الترابية في الصحراء الغربية خلال النهار والليل وعلى مدار اليوم خلال العقدين الماضيين؟
2. كيف تتوزع تأثيرات العواصف على شبكة الطرق جغرافيًا وشهرياً؟

ثانياً: المنهجية:

1.البيانات

تم الاعتماد على بيانات إعادة التحليل من **Copernicus Atmosphere Monitoring Service – Atmospheric Data Store (CAMS ADS)** التابعة للمركز الأوروبي للتنبؤات الجوية متوسطة المدى .(ECMWF) شملت المتغيرات:

PM10 (µg/m³): الجسيمات العالقة ذات القطر الهوائي أقل من 10 ميكرومتر.

DUAOD550: العمق البصري للغبار عند الطول الموجي 550 نانومتر (Dust Aerosol Optical Depth).

Dust (µg/m³):

- غبار ناعم: 0.03–0.55µm
- غبار متوسط: 0.55–0.9µm
- غبار خشن: 0.9–20µm

جمعت البيانات بصيغة NetCDF3 على شبكة زمنية ثلاثية الساعات للفترة من يناير 2003 حتى ديسمبر 2023.

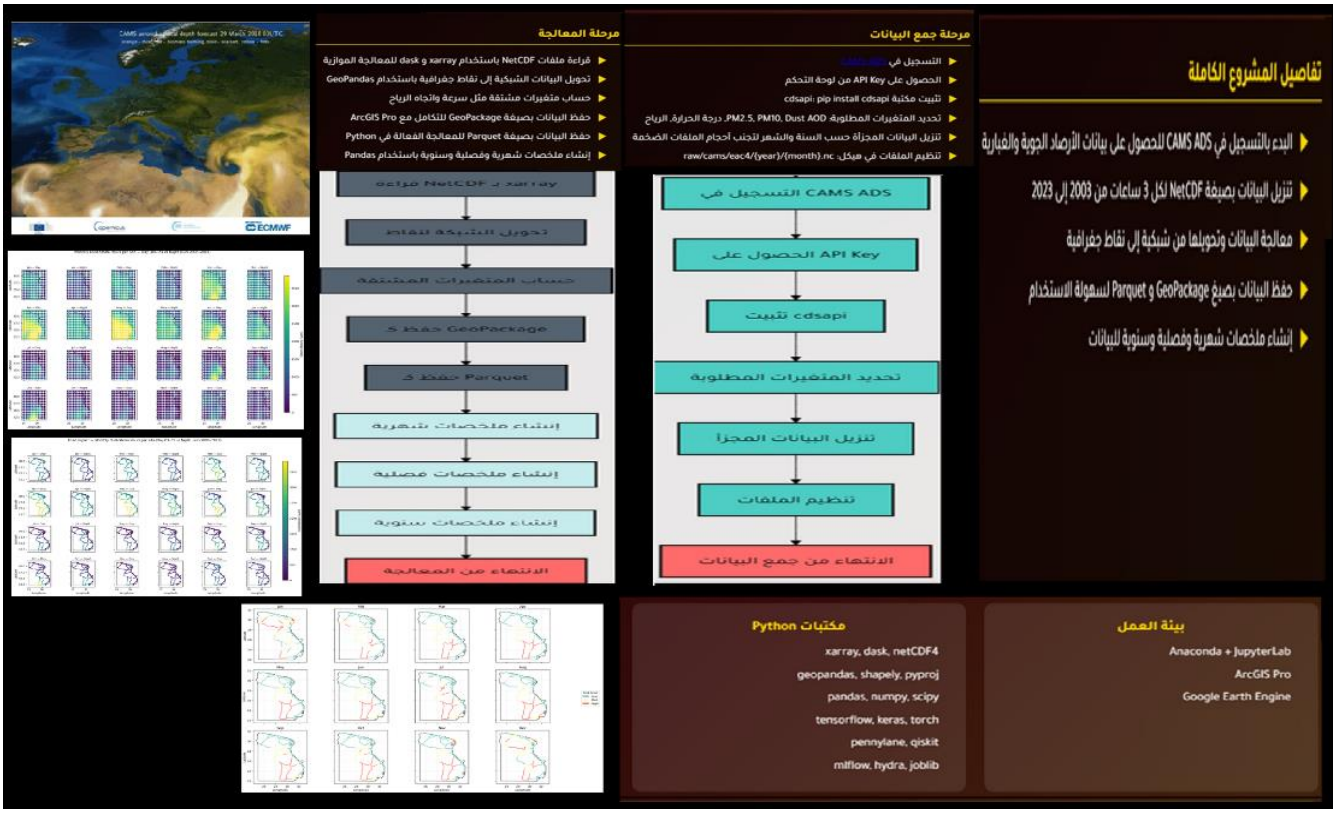
2.معالجة البيانات

قراءة البيانات :باستخدام مكتبات **xarray** و**dask** للتعامل مع الملفات الكبيرة.

إعادة الإسقاط المكاني :تحويل البيانات إلى نقاط شبكية مكانية باستخدام **geopandas** وربطها بإحداثيات شبكة الطرق.

التجميع الزمني :احتساب المتوسطات اليومية ثم الشهرية والفصلية والسنوية.

التخزين :تصدير النتائج بصيغة **GeoPackage**و **Parquet**لسهولة الربط مع نظم المعلومات الجغرافية.



المصدر: اعداد الباحث بالاعتماد على Canva

شكل(1) منهجية البحث

3.تعريف أحداث العواصف الغبارية

لتحديد ساعات العواصف الغبارية، تم استخدام عتبات كمية (Thresholds) استُمدت من التوزيع الإحصائي للبيانات الـ percentiles العالية التي تمثل ظروفًا استثنائية. العتبات المستخدمة:

- PM10 > **163.7 µg/m³**
- DUAOD550 > **0.285**
- Dust 0.03–0.55 µm > **26.6 µg/m³**
- Dust 0.55–0.9 µm > **60.1 µg/m³**
- Dust 0.9–20 µm > **166.2 µg/m³**

اعتبر أي توقيت تتجاوز فيه القيم واحدة أو أكثر من هذه العتبات بمثابة **ساعة عاصفة غبارية** .بعد ذلك تم جمع عدد الساعات على أساس يومي/شهري/سنوي، وإسقاطها مكانيًا على شبكة الطرق.

4.التحليل المكاني للطرق

- تم الحصول على شبكة الطرق من Google Earth Engine
- أُسقطت قيم ساعات العواصف على الطرق الرئيسة والفرعية داخل الصحراء الغربية.
- جرى تصنيف مستوى الخطورة إلى:
  - **منخفض :(Low)** أقل من 500 ساعة خلال فترة الدراسة 25> ~ ساعة/سنة.
  - **متوسط :(Medium)** بين 500–2000 ساعة ~25–95 ساعة/سنة.
  - **مرتفع :(High)** أكثر من 2000 ساعة 95> ساعة/سنة.

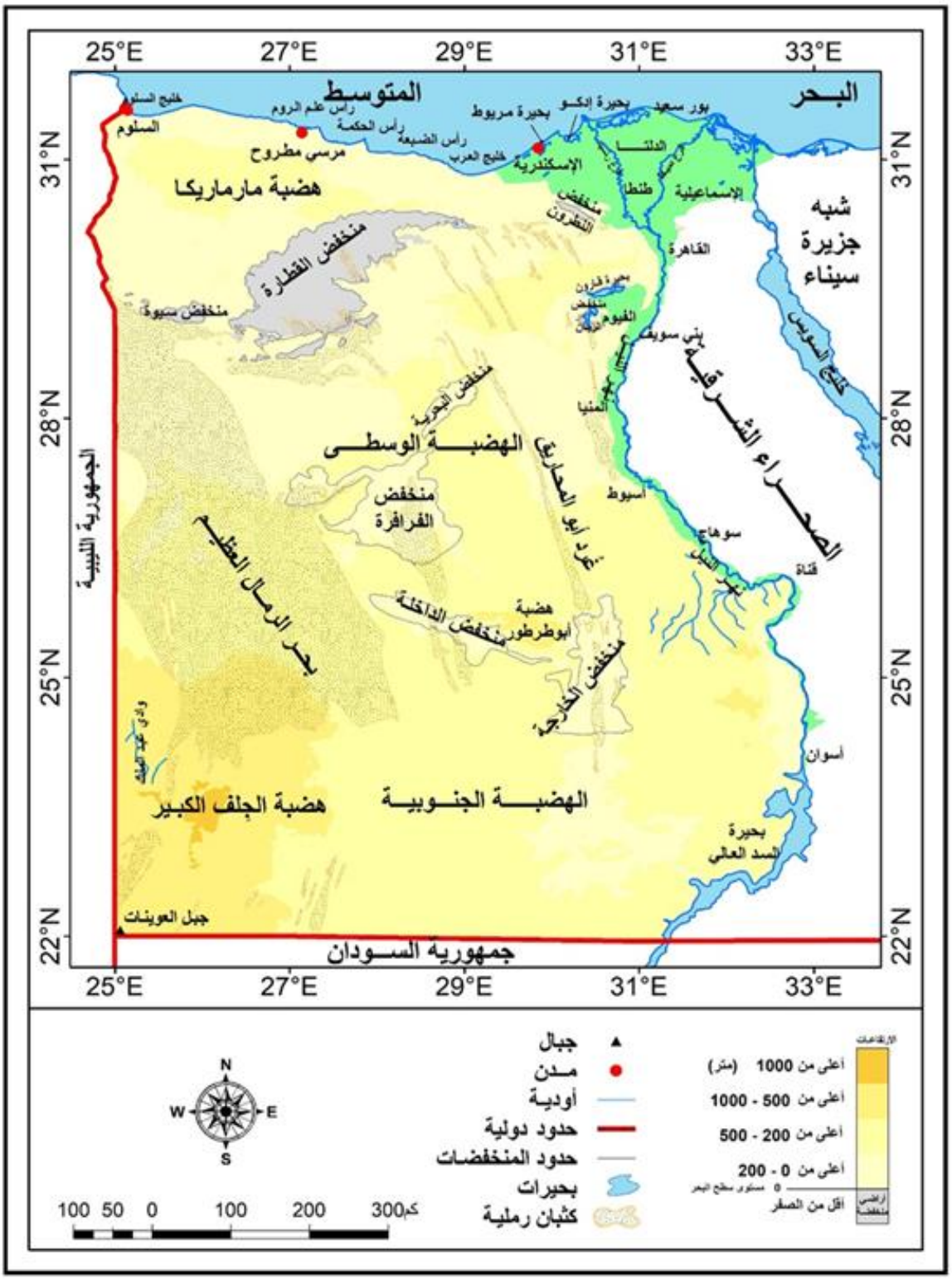
5.أدوات العمل

- **Python:** xarray، dask، netCDF4، geopandas، shapely، pyproj، pandas، numpy، scipy
- **GIS platforms:** ArcGIS Pro، Google Earth Engine
- **بيئة تشغيل:** Anaconda + JupyterLab.

ثالثاً: التحليل:

تتميز الصحراء الغربية بطبيعة جغرافية جافة حيث تكثر بها الكثبان الرملية والمناطق القاحلة والمنخفضات الأرضية مما يجعلها مسلكاً لحركة الرياح الشديدة الحاملة للغبار والذي بدوره يؤثر على شبكة الطرق الرئيسية من وإلى مناطق السكن والعمل لسكان الصحراء الغربية بمصر.

وتعتبر الصحراء الغربية شحيحة المطر وذات مستويات رطوبة منخفضة جدا نظراً لندرة الموارد المائية بها مما يزيد من الجفاف في تربتها الرملية، مما ينعكس على النشاط السائد للرياح بها شبه الدائم.



المصدر:اعداد الباحث بالاعتماد على الخريطة الطبوغرافية لمصر مقياس 1:1000000

شكل (2) الخصائص الجيمورفولوجية للصحراء الغربية

الآثار المترتبة على العواصف الغبارية: العواصف الغبارية تُعَد من أبرز الظواهر المناخية المؤثرة في البيئات الصحراوية، حيث تتولد بفعل الرياح القوية التي تثير جزيئات التربة والرمال الدقيقة وتنقلها عبر مسافات بعيدة. هذه الظاهرة تترك آثارًا بيئية وصحية واقتصادية متشابكة؛ فمن الناحية الصحية ترتبط بارتفاع معدلات أمراض الجهاز التنفسي والعيني، وزيادة فرص الإصابة بالحساسية والربو، خاصة لدى الفئات الأكثر هشاشة كالأطفال وكبار السن. أما على البنية التحتية، فتؤدي إلى تراجع الرؤية الأفقية بشكل حاد مما يرفع مخاطر الحوادث المرورية، ويعطل النقل الجوي والبري، ويؤثر سلبًا على شبكات الطاقة الشمسية والكهربية نتيجة تراكم الغبار. كما أن استمرار العواصف يسرّع من تدهور التربة ويعزز التصحر عبر نزع الطبقة السطحية الغنية بالعناصر الغذائية. وفي المناطق الصحراوية مثل الصحراء الغربية في مصر، تزداد هذه التأثيرات حدّة نظرًا لاتساع المساحات الجافة المفتوحة وامتداد الطرق الحيوية وسط بيئة قليلة الغطاء النباتي، مما يجعل دراسة ديناميات العواصف الغبارية

جزءًا أساسيًا من التخطيط للتنمية المستدامة والحد من المخاطر البيئية.

المصدر:-https://cdn.al-ain.com/lg/images/2024/8/11/196-132833-new-valley-storm-2.jpeg

شكل(3) عاصفة غبارية في محافظة الوادي الجديد بتاريخ 2024/8/11

تظهر بيانات ساعات العواصف الترابية على امتداد صحراء مصر الغربية خلال الفترة 2003–2023 نمطًا موسميًا واضحًا يتداخل فيه التغير بين النهار والليل مع التغير عبر الفصول. في مطلع

الشتاء، أي في ديسمبر ويناير، تسجَّل مستويات متوسطة إلى منخفضة من ساعات العواصف، إذ تتراوح غالبًا بين 800 و1500 ساعة نهارًا، بينما تقل عن ذلك ليلًا لتصل في بعض المواقع إلى نحو 400–900 ساعة فقط. هذا يعكس دور المنخفضات الشتوية العابرة، حيث تنشط الرياح السطحية نهارًا نتيجة الفروق الحرارية الطفيفة، بينما يظل الليل أقل فعالية بسبب استقرار الغلاف الجوي. في فبراير ومارس يزداد النشاط تدريجيًا، حيث ترتفع القيم إلى نطاق 1500–3300 ساعة في بعض مناطق الجنوب والوسط، ما يعني أن معدل الساعات السنوي قد يصل إلى 140 ساعة تقريبًا في بعض البؤر. ويظل الفارق بين النهار والليل واضحًا، إذ تتفوق ساعات النهار بما يقارب الضعف نتيجة لزيادة عمق طبقة الخلط الهوائي مع بداية الربيع.

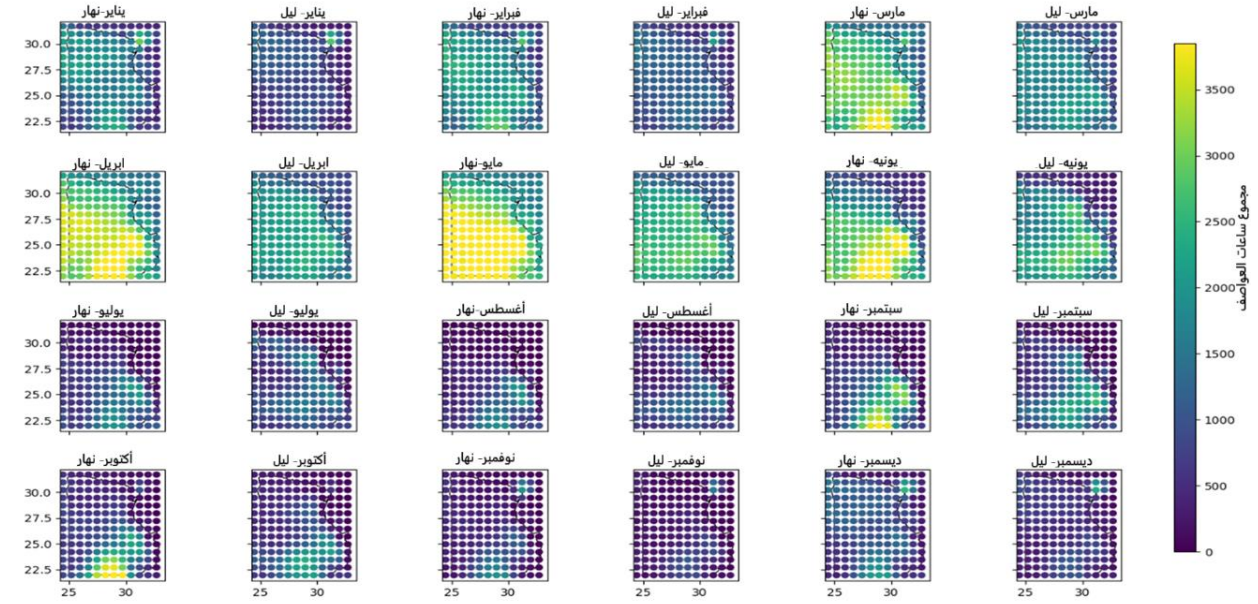
في أبريل ومايو يصل النشاط إلى ذروته المطلقة، وتُظهر الخرائط مناطق واسعة من الجنوب والجنوب الغربي مغطاة بألوان تمثل 3000–4000 ساعة تراكمية عبر العقدين الماضيين، أي ما يعادل قرابة 180 ساعة في السنة (7–8 أيام سنويًا). هذه الذروة ترتبط بتزامن عوامل مناخية متعددة: جفاف السطح، وزيادة شدة الإشعاع الشمسي، وعبور منخفضات حرارية تدفع الرياح عبر الحدود الغربية للصحراء. الليل في هذه الفترة نشط هو الآخر، لكنه يظل أقل، عند حدود 1500–2800 ساعة، مما يبرز تفوق ساعات النهار بما يقارب 1.5 إلى 2 مرة. ومع دخول يونيو يستمر النشاط قويًا نسبيًا لكنه يبدأ في الانحسار تدريجيًا، حيث تُسجل 2300–3200 ساعة نهارًا، مقابل نحو 1000–2000 ليلًا، وهو ما يعكس الانتقال البطيء من الذروة الربيعية إلى هدوء الصيف.

في شهري يوليو وأغسطس يلاحظ الانخفاض الحاد في عدد الساعات، حيث لا تتجاوز القيم 600–1400 ساعة في يوليو نهارًا، ثم تصل إلى مستويات هي الأدنى خلال العام في أغسطس، إذ تتراوح بين 300 و800 ساعة فقط. الليل في هذه الفترة أكثر هدوءًا ولا يتجاوز في أغلب المناطق 600 ساعة، ما يشير إلى استقرار الغلاف الجوي الصيفي، وضعف فعالية الرياح السطحية في إثارة الغبار، وربما تأثر الصحراء الغربية بامتداد منخفض السودان الذي يرفع الرطوبة النسبية نسبيًا ويحد من العواصف الترابية. ابتداءً من سبتمبر، يعود النشاط بشكل ملحوظ، حيث ترتفع القيم مجددًا إلى نطاق 1500–2300 ساعة في الجنوب، ثم يستمر هذا الانتعاش في أكتوبر حيث تبرز بؤر محلية عند حدود 1200–2000 ساعة، خاصة في الجنوب الغربي. هنا يصبح الفارق بين النهار والليل أضعف، إذ تقل النسبة إلى نحو 1.3–1.6، ما يوحي بأن الاضطرابات الخريفية قصيرة المدى تؤثر في الليل والنهار معًا.

مع دخول نوفمبر يتراجع النشاط مرة أخرى، حيث تعود الساعات إلى 600–1000 نهارًا و300–800 ليلًا، ثم يتكرر المشهد الشتوي في ديسمبر مع ارتفاع طفيف عن نوفمبر خاصة في الشمال الشرقي. بذلك يتضح أن الدورة السنوية في صحراء مصر الغربية تُظهر قوسًا صاعدًا من الشتاء نحو ذروة ربيعية شديدة في أبريل–مايو، تليها فترة ركود صيفية حادة في يوليو–أغسطس، ثم انتعاشة خريفية قصيرة قبل عودة التراجع. ومن الناحية الفيزيائية، يظل النهار متفوقًا على الليل طوال العام تقريبًا بنسبة تتراوح بين 1.3 و2.5 مرة، وهو ما يفسَّر بالاختلاف في البنية الحرارية للغلاف الجوي.

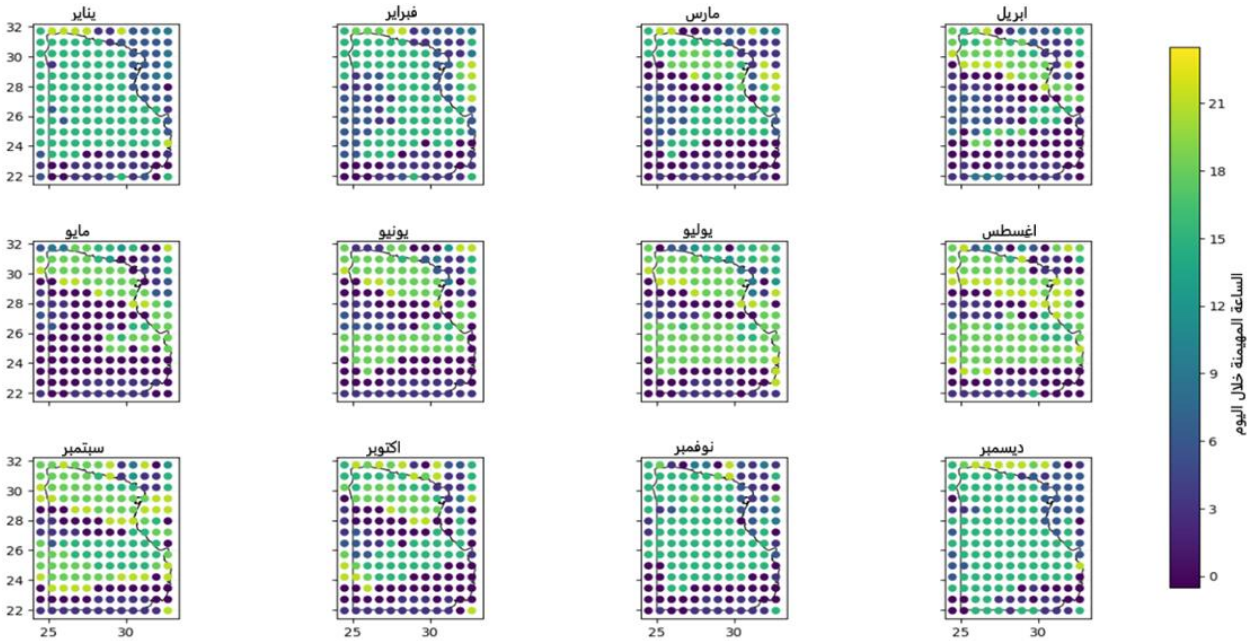
هذه النتائج تحمل دلالات بيئية وصحية واقتصادية واضحة؛ إذ أن أكثر الفترات خطورة للتعرض للعواصف الترابية تتركز في الربيع، خصوصًا بين أبريل ومايو، حيث تتجاوز ساعات التعرض المحتملة سبعة أيام في السنة في بعض المواقع. وبذلك فإن المجتمعات الريفية والعاملين في الهواء الطلق في الصحراء الغربية معرضون لمستويات مرتفعة من التلوث الجوي بالغبار خلال هذه الفترة. وهذا

يستدعي إدماج هذه المعرفة في سياسات الإنذار المبكر، وتخطيط ورديات العمل الزراعي والإنشائي، ووضع خطط للتخفيف مثل الزراعة الحاجزية أو الإدارة المستدامة للأراضي المكشوفة للحد من إثارة الغبار.



المصدر: إعداد الطالب بالاعتماد على قاعدة بيانات CAMS Global Reanalysis – EAC4 باستخدام Anaconda Notebook

شكل(4) التوزيع المكاني لعدد ساعات العواصف الغبارية شهرياً حسب النهار والليل



المصدر: إعداد الطالب بالاعتماد على قاعدة بيانات CAMS Global Reanalysis – EAC4 باستخدام Anaconda Notebook

شكل(5) التوزيع المكاني لأكثر ساعات اليوم على مدار الأشهر تأثراً بالعواصف الغبارية

تعكس **الساعة المهيمنة للعواصف الترابية في كل موقع داخل الصحراء الغربية لمصر** خلال الفترة 2003–2023، أي أي ساعة من اليوم (0–23) هي الأكثر تكرارًا لحدوث العواصف في كل نقطة شبكية، شهراً بعد شهر. مقياس الألوان يوضح: البنفسجي للأوقات المبكرة من الليل (0–3)، الأزرق/الأخضر للفترة الصباحية حتى بعد الظهر (6–15)، والأصفر يمثّل ساعات المساء المتأخرة (حتى 21–23).

في شهور الشتاء مثل يناير وفبراير، يظهر النمط بوضوح في الشمال والشمال الغربي حيث تسود ساعات متأخرة من الليل وبداية الصباح (0–6 ساعات) بلون بنفسجي مزرق، بينما تظهر مناطق أخرى تميل إلى الأخضر/الأصفر أي أن النشاط يتركز في النهار المتأخر أو المساء. هذا يعكس الطبيعة الديناميكية للمنخفضات الشتوية التي قد تثير الغبار مع مرور الجبهات الباردة ليلًا ونهارًا على حد سواء، لكن مع تفضيل موضعي لساعات الليل والفجر خاصة في الشمال.

مع بداية الربيع في مارس وأبريل، يتسع انتشار الألوان الخضراء في معظم الصحراء الغربية، أي أن الساعات الأكثر تكرارًا للعواصف تصبح في نطاق 9–15، وهي فترة النهار المتوسطة والمتأخرة. هذه النتيجة متسقة مع الذروة الربيعية التي أظهرتها الخريطة السابقة لمجموع الساعات، حيث يلعب التسخين الشمسي وعمق طبقة الخلط دورًا حاسمًا في رفع الغبار إلى الغلاف الجوي. في مايو يظهر الانزياح أكثر وضوحًا: معظم المنطقة مصبوغة بالبنفسجي الداكن، أي أن الساعات المهيمنة للعواصف هي الصباحية المبكرة جدًا (0–6). هنا تتضح صورة مختلفة: على الرغم من أن النشاط الكلي للعواصف في مايو هو الأعلى، فإن التوقيت يميل بشكل حاسم نحو الساعات الأولى من اليوم. هذه إشارة إلى أن تربة الصحراء الغربية الجافة جدًا، مع هبوط درجات الحرارة ليلًا وبدء التسخين فجأة بعد الفجر، تولّد رياحًا قوية مبكرة تعصف بالغبار قبل أن تتبدد لاحقًا.

في الصيف (يونيو حتى أغسطس) يتواصل هذا الانقسام. في يونيو ما زالت هناك مناطق واسعة تُظهر الساعات الليلية والصباحية (0–6) مسيطرة، بينما تبرز بقع شمالية تميل إلى اللون الأخضر أي منتصف النهار. في يوليو وأغسطس، ومع انخفاض النشاط الكلي للعواصف كما أظهرت الخريطة الأولى، تصبح الساعات المهيمنة أكثر تشتتًا: معظم النقاط تميل إلى الأخضر أي منتصف النهار (9–15)، بينما تبقى الجيوب الجنوبية في البنفسجي الداكن حيث الفجر هو الزمن الأكثر تكرارًا. هذه المرونة في التوقيت تعكس ضعف القوى المثيرة للعواصف في الصيف واستقرار الجو، ما يجعل حدوث العواصف مرتبطًا أكثر بظواهر محلية كالهبوب أو التيارات الحرارية المحدودة.

مع حلول الخريف في سبتمبر وأكتوبر، تنتشر الألوان الخضراء مجددًا عبر مناطق واسعة، أي أن الساعات الأكثر شيوعًا هي النهارية (9–15). لكن في الأطراف الجنوبية والشرقية تعود بقع بنفسجية داكنة تعكس نشاطًا فجريًا وصباحيًا مبكرًا. هذا الانقسام يعكس أن العواصف الخريفية عادة ما تنشأ من اضطرابات سطحية أو مرور موجات علوية تؤثر في النهار، لكنها قد ترتبط أيضًا برياح ليلية قوية في المناطق الجنوبية المفتوحة. في نوفمبر وديسمبر يعود المشهد إلى ما يشبه الشتاء: سيطرة أكبر للألوان البنفسجية والزرقاء أي أن الفجر والساعات الأولى من النهار (0–6، وربما حتى 9) هي التوقيت الأكثر تكرارًا، خاصة على امتداد الشمال الغربي وحتى داخل عمق الصحراء الغربية.

القراءة العلمية لهذه الخرائط تبيّن أن صحراء مصر الغربية لا تعاني فقط من اختلاف موسمي في **شدة** العواصف الترابية، بل أيضًا من اختلاف منتظم في **توقيتها اليومي** .الذروة الربيعية (أبريل–مايو) ليست فقط أعلى من حيث التكرار، بل تتركز في ساعات الفجر والصباح الباكر، ما يعني أن التجمعات السكانية والعاملين الميدانيين في هذا الإقليم يواجهون أعلى مستويات التعرض في بداية اليوم. بينما في الصيف والخريف يتوزع النشاط على ساعات منتصف النهار، وفي الشتاء يتكرر غالبًا في الفجر والمساء المبكر. هذه المعلومات تضيف بعدًا مهمًا لأي خطة للتكيف: فإجراءات الحماية والإنذار المبكر يجب أن تُضبط ليس فقط حسب الشهر ولكن أيضًا حسب الساعة المهيمنة، بحيث تكون أنظمة الإنذار المجتمعية مرنة زمنياً.

تأثير العواصف الترابية على الطرق في الصحراء الغربية:

حيث تم حساب مجموع ساعات العواصف على امتداد شبكة الطرق الرئيسية خلال الفترة 2003–2023، مع الفصل بين النهار (03–15) والليل. ظهور الطرق على الخريطة يضيف بعدًا تطبيقيًا مباشرًا، إذ أن أي ارتفاع في القيم على هذه الخطوط يعني زيادة مخاطر الحوادث وتعطيل النقل.

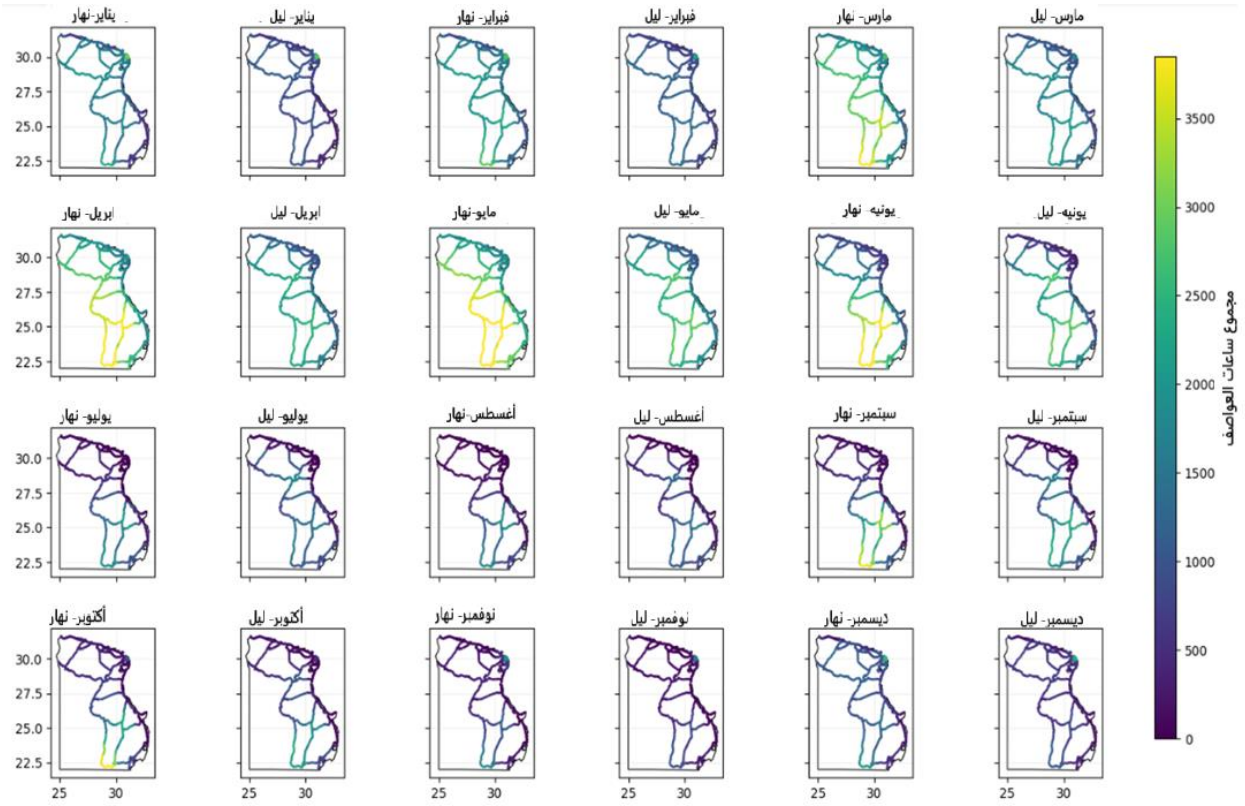
في فصل الشتاء، أي يناير وفبراير، تتضح ساعات عواصف متوسطة على الطرق الشمالية والغربية، خصوصًا نهارًا حيث تصل القيم إلى حدود 1000–2000 ساعة تراكمية. هذه المستويات، على مدى 21 عامًا، تعني ما يعادل نحو 50–90 ساعة سنويًا (2–4 أيام) من ضعف الرؤية على الطرق. الليل أقل خطرًا في هذا الموسم، حيث تنخفض القيم غالبًا دون 1000 ساعة. في مارس وأبريل يتضاعف المشهد، إذ تظهر الطرق المركزية والجنوبية الغربية مغطاة بألوان تتراوح بين 2000 و3000 ساعة، وأحيانًا تقترب من 3500 ساعة في النهار. هذه القيم تعني ما يعادل أسبوعًا كاملًا تقريبًا من التعطّل سنويًا في بعض المقاطع، وهو ما يفسر تزايد الحوادث الموسمية وتقارير إغلاق الطرق في الربيع.

شهر مايو يقدّم الذروة القصوى على الطرق، خاصة في الامتداد الجنوبي والجنوب الغربي، حيث تتجاوز بعض المقاطع 3500–4000 ساعة تراكمية في النهار، أي ما يقارب 180 ساعة في السنة. الطرق في هذه المنطقة تُصبح أكثر عرضة للانقطاع نهارًا، بينما الليل يُظهر نشاطًا معتبرًا لكنه أقل (1800–2800 ساعة). ومع دخول يونيو، تستمر الخطورة لكنها تنحسر تدريجيًا، إذ تتراوح القيم بين 2000 و3000 ساعة على الطرق المركزية، مقابل 1000–2000 ساعة ليلًا.

أما في يوليو وأغسطس، فيظهر الانخفاض الحاد في تأثير العواصف على الطرق، إذ نادرًا ما تتجاوز القيم 800–1200 ساعة تراكمية، أي أقل من 50 ساعة سنويًا. هذه الفترة تعكس حالة الركود الصيفي التي سبق توثيقها، وتُعد أكثر الشهور أمانًا نسبيًا لحركة النقل البري عبر الصحراء الغربية. لكن منذ سبتمبر يبدأ النشاط في الصعود مجددًا، حيث تصل الطرق الجنوبية إلى 2000 ساعة نهارًا، في حين يبقى الليل أقل. في أكتوبر، يبرز نشاط محدود لكن واضح في القطاع الجنوبي، ثم يتراجع بقوة في نوفمبر. أما ديسمبر فيعود فيه النشاط نسبيًا في الطرق الشمالية مع قيم بين 800 و1500 ساعة.

المحصلة أن **أخطر الشهور على شبكة الطرق الصحراوية** هي مارس–يونيو، وخاصة أبريل ومايو حيث تتجاوز ساعات العواصف على بعض الطرق 7–8 أيام سنويًا من التعطّل المحتمل. وتُظهر الخرائط أن الخطر يتركّز بوضوح في الطرق الجنوبية والغربية، بينما تقل الحدة على الطرق الشمالية باستثناء الشتاء. هذه النتائج تحمل دلالات مباشرة لسياسات السلامة المرورية: من الضروري إدماج

نظم إنذار مبكر للعواصف الترابية في تخطيط الرحلات البرية خلال الربيع، وإعادة النظر في توقيت حركة القوافل والشاحنات الثقيلة لتجنب ساعات الذروة النهارية. كما ينبغي تعزيز البنية التحتية الداعمة مثل لوحات إرشاد إلكترونية على الطرق السريعة تنبّه السائقين لحالات ضعف الرؤية، إلى جانب نشر ملاجئ أو نقاط انتظار آمنة على امتداد الطرق الأكثر عرضة.



المصدر: إعداد الطالب بالاعتماد على قاعدة بيانات CAMS Global Reanalysis – EAC4 باستخدام Anaconda Notebook

شكل (6) شبكات الطرق المتأثرة بالعواصف الغبارية نهاراً وليلاً

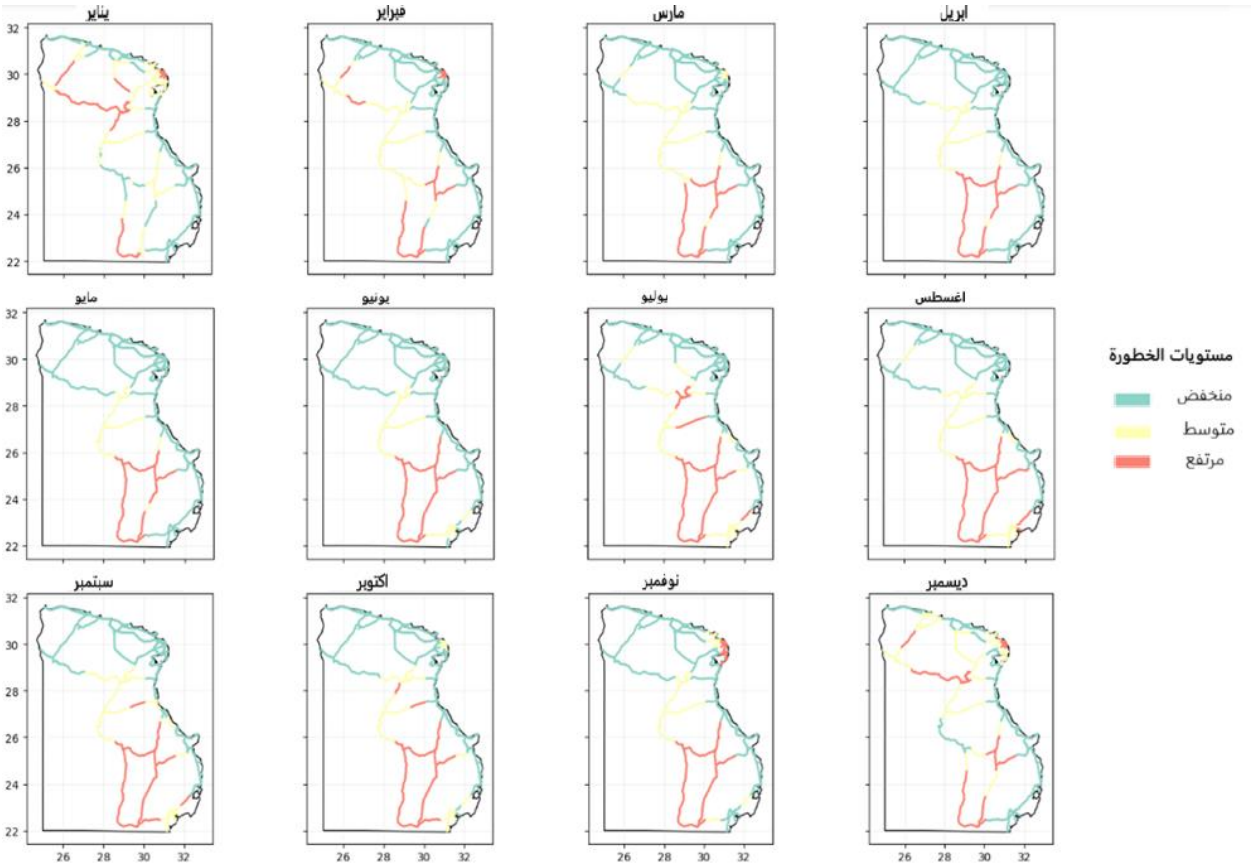
مستويات خطورة الطرق:

في الشتاء (يناير–فبراير)، تتركز الخطورة المرتفعة باللون الأحمر على **طريق واحة سيوة – مرسى مطروح** وكذلك مقاطع من **الطريق الساحلي الشمالي** خاصة قرب السلوم وسيدي براني، وهي مناطق مفتوحة للرياح الشمالية الغربية. وتظهر أيضًا بؤر حمراء قرب **طريق القاهرة – وادي النطرون – العلمين**، ما يشير إلى أن شمال الصحراء يتأثر بشدة في هذه الفترة.

مع دخول الربيع (مارس–أبريل–مايو) تتوسع المساحات ذات الخطورة المرتفعة لتشمل **الطرق المؤدية إلى واحات الداخلة والخارجة** مرورًا بالهضبة الوسطى، إضافة إلى **طريق الفرافرة – الواحات البحرية**، وهي مناطق مفتوحة وجافة تعزز تطاير الرمال. الطرق جنوب الخارجة باتجاه **الواحات الداخلة ثم أبو طرطور** تُظهر خطرًا مرتفعًا أيضًا، ما ينعكس على حركة الشاحنات المرتبطة بالنشاط

التعديني. مايو على وجه الخصوص هو الأكثر خطورة على **الطريق من أسيوط إلى الخارجة**، وكذلك **الطريق الرابط بين الفرافرة والبحرية** حيث يظهر باللون الأحمر معظم الشهر.

في الصيف (يونيو–أغسطس)، تظل بعض الطرق الداخلية عالية الخطورة، خصوصًا **الطريق الممتد عبر هضبة الجلف الكبير باتجاه الحدود السودانية**، إضافة إلى أجزاء من **طريق الواحات الخارجة – الداخلة – باريس** .أما الطرق الساحلية الشمالية فتبدو أقل خطورة نسبيًا خلال الصيف، نتيجة هدوء نسبي للعواصف في هذا الموسم.



المصدر: إعداد الطالب بالاعتماد على قاعدة بيانات CAMS Global Reanalysis – EAC4 باستخدام Anaconda Notebook

شكل(7) الملائمة المكانية لخطورة الطرق المتأثرة بالعواصف الغبارية شهرياً

في الخريف (سبتمبر–أكتوبر)، يظل الخطر المرتفع متركزًا على المحاور الجنوبية :**طريق الداخلة – شرق العوينات** وكذلك **الطرق الفرعية داخل الهضبة الجنوبية** .في حين أن الطرق الشمالية (مثل طريق مرسى مطروح – الإسكندرية) تشهد خطورة متوسطة (أصفر) أو منخفضة (أخضر). هذا يعكس انتقال النشاط الغباري نحو الداخل مع تغير النظام الموسمي للرياح.

أما في نوفمبر وديسمبر، فتعود الخطورة مرة أخرى إلى الشمال، خاصة على **الطريق الساحلي الدولي من السلوم حتى مرسى مطروح**، وأجزاء من **طريق القاهرة – العلمين**، وهو ما يتفق مع بداية نشاط المنخفضات الشتوية القادمة من البحر المتوسط.

رابعاً: النتائج:

أظهرت التحليلات المكانية والزمنية للعواصف الغبارية في الصحراء الغربية لمصر (2003–2023) أن الظاهرة تتميز بدورة موسمية واضحة وتفاوت مكاني ملحوظ. فقد تبين أن عدد ساعات العواصف يبلغ ذروته خلال شهري أبريل ومايو، حيث تتجاوز القيم التراكمية في بعض المناطق **3500–4000ساعة** خلال فترة الدراسة، أي ما يعادل **170–190ساعة سنويًا**، وهو ما يعكس تعرض الطرق الواقعة في الجنوب الغربي والوسط لمستويات خطورة مرتفعة. بالمقابل، شهدت أشهر يوليو وأغسطس أدنى المعدلات، إذ لم تتجاوز معظم المواقع **300–800ساعة** على مدى 21 عامًا، أي أقل من 40 ساعة سنويًا.

أظهر تحليل التوقيت اليومي للعواصف أن الساعات المهيمنة تختلف حسب الفصل؛ ففي الشتاء والخريف برزت ساعات الفجر والصباح الباكر (0–6 ساعات) باعتبارها الأكثر تسجيلًا للأحداث، بينما في الربيع هيمنت ساعات النهار المتوسطة والمتأخرة (9–15 ساعة). أما الصيف فتميز بتوزيع متباين شمل الفجر والنهار معًا، لكنه ظل منخفض الشدة مقارنة ببقية الفصول.

عند إسقاط ساعات العواصف على شبكة الطرق الرئيسية، تبين أن أكثر المحاور تأثرًا هي:

- **طريق الداخلة – الخارجة – الفرافرة – الواحات البحرية**، حيث تجاوزت ساعات العواصف مستوى **High (>2000ساعة** (معظم شهور الربيع.
- **طريق الخارجة – أسيوط – أبو طرطور**، الذي ظهر ضمن أكثر الطرق عرضة للمخاطر، خاصة في الفترة من مارس إلى يونيو.
- **الطرق الجنوبية المؤدية إلى شرق العوينات والحدود السودانية**، والتي سجلت مستويات خطورة مرتفعة في معظم شهور الصيف والخريف.
- **الطريق الدولي الساحلي (السلوم – مرسى مطروح – الإسكندرية)**، الذي تميز بارتفاع الخطورة في الشتاء نتيجة للمنخفضات المتوسطية.

أظهر تصنيف مستويات الخطورة أن حوالي **35–40% من شبكة الطرق** تقع ضمن فئة الخطورة المرتفعة(High) ، بينما تندرج نسبة 30% ضمن الفئة المتوسطة(Medium) ، والباقي ضمن الفئة المنخفضة .(Low) هذا يبرز أن أكثر من ثلث الشبكة معرض بشكل متكرر لعواصف تؤدي إلى تعطيل محتمل للنقل البري وانخفاض الرؤية.

خامساً: المناقشة:

تؤكد النتائج أن العواصف الغبارية في الصحراء الغربية المصرية تتسم بدورة موسمية واضحة تبلغ ذروتها في الربيع وأوائل الصيف، خاصة في أبريل–مايو، وهو ما يتسق مع الأدبيات التي تُعد شمال أفريقيا أكبر مصدر عالمي للغبار المعدني وتربط الذروات بالفترات الانتقالية وتباينات الضغط بين الكتل الهوائية .(Middleton, 2017)

يظهر التحليل الزمني اختلاف الساعات المهيمنة لحدوث العواصف باختلاف الفصول؛ إذ تسود ساعات الفجر والصباح الباكر في الشتاء والخريف، بينما يزداد النشاط في منتصف النهار خلال الربيع، بما يتوافق مع دور التسخين الشمسي في تعزيز الحمل الحراري نهارًا وأنماط الرياح الليلية المرتبطة بالتدرجات الحرارية عند الفجرHamzeh et al., 2021 ؛ Goudie, 2014

وترتفع أهمية هذه النتائج تطبيقيًا عند ربطها بشبكة الطرق؛ إذ تتأثر محاور الواحات (الداخلة–الخارجة–الفرافرة–البحرية) ومحور الخارجة–أسيوط–أبو طرطور، إلى جانب الطريق الدولي الساحلي شتاءً، بما ينعكس على النقل والتنمية. وتُظهر دراسات محلية وإقليمية أن العواصف الغبارية تمثل تهديدًا مباشرًا للبنية التحتية والسلامة، وتؤكد الحاجة إلى إنذار مبكر موسمي/زمني وتدابير تشغيلية على الطرق عالية الخطورة .(Ashrafi et al., 2014)

منهجياً، يبرز دمج بيانات إعادة التحليل العالمية والتحليل المكاني (GIS) قيمة علمية وعملية؛ فبينما ركزت أعمال عديدة على المراصد المحلية أو منتجات الأقمار الصناعية لمنطقة مصر/شرق المتوسط Georgoulias et al., ؛ El-Metwally et al., 2011؛(El-Metwally et al., 2008 (2016، فإن الإطار المستخدم هنا يوفّر تقييمًا كمّيًا قابلاً للتكرار يمكن إدماجه في سياسات التكيّف المروري والبيئي .

سادساً: الخاتمة:

تكشف هذه الدراسة أن العواصف الغبارية في الصحراء الغربية لمصر تمثل خطرًا متكررًا وذا أبعاد متعددة، يتجاوز تأثيره الحدود البيئية ليصل إلى البنية التحتية وشبكات النقل البري. أظهرت التحليلات المكانية الشهرية للفترة 2003–2023 أن الظاهرة تتميز بذروة واضحة في فصلي الربيع وأوائل الصيف، خاصة في شهري أبريل ومايو، حيث تتجاوز ساعات العواصف في بعض المقاطع الطرقية 180 ساعة سنويًا. كما برزت فروق زمنية يومية في توقيت العواصف، حيث يهيمن النشاط الفجري والصباحي في الشتاء والخريف، بينما يزداد النشاط النهاري في الربيع، وهو ما يزيد من خطورة الظاهرة نظرًا لتزامنها مع أوقات الذروة المرورية.

تظهر النتائج أن الطرق الأكثر تعرضًا للخطر تشمل محاور **الداخلة – الخارجة – الفرافرة – الواحات البحرية**، بالإضافة إلى **الطريق الخارجة – أسيوط – أبو طرطور**، والطرق الجنوبية المؤدية إلى شرق العوينات، في حين يبرز الطريق الدولي الساحلي (السلوم – مرسى مطروح – الإسكندرية) في فصل الشتاء. إن هذا التوزيع المكاني للخطورة يعكس التفاعل المعقد بين الأنماط المناخية الموسمية والطوبوغرافيا المحلية، ويؤكد الحاجة إلى استراتيجيات متخصصة لإدارة المخاطر في هذه المناطق الحيوية.

من الناحية العلمية، تبرهن هذه الدراسة على فاعلية دمج بيانات إعادة التحليل العالمية (CAMS ADS) مع أدوات التحليل المكاني في نظم المعلومات الجغرافية، لتوليد تقييم كمّي وخرائط مكانية دقيقة لمخاطر العواصف الغبارية. وبهذا، فإن النتائج لا تسهم فقط في إثراء المعرفة الأكاديمية حول ديناميات الغبار في شمال أفريقيا، بل تقدم أيضًا مدخلًا عمليًا لدعم خطط التكيف مع التغيرات المناخية في مصر.

سابعاً: التوصيات:

1. **تعزيز الإنذار المبكر :**إنشاء نظام إنذار مبكر يعتمد على بيانات إعادة التحليل والنماذج العددية، مع تخصيص نشرات مرورية في فصلي الربيع والشتاء.
2. **إجراءات السلامة على الطرق :**تزويد المحاور عالية الخطورة (مثل الخارجة–أبو طرطور والداخلة–الفرافرة) بلوحات إرشاد إلكترونية ومحطات انتظار آمنة على مسافات منتظمة.
3. **الرصد البيئي المستمر :**تركيب محطات قياس محلية لتراكيز الغبار على طول الطرق الجنوبية (شرق العوينات) لزيادة دقة التنبؤات وربطها بخرائط المخاطر.
4. **التخطيط المروري المرن :**إعادة جدولة حركة القوافل والشاحنات الثقيلة في الفترات الأكثر خطورة (الصباح الباكر في الربيع) لتقليل احتمالات الحوادث.
5. **دمج النتائج في السياسات الوطنية :**تضمين خرائط الخطورة الناتجة في خطط وزارة النقل وهيئة الطرق والكباري ضمن استراتيجيات التكيف المناخي وخطط التنمية المستدامة 2030.
6. **إجراءات مجتمعية :**رفع الوعي لدى المجتمعات المحلية والسائقين بخطورة الظاهرة، من خلال برامج توعوية وتوزيع أدوات وقاية) مثل أقنعة (N95 أثناء الذروات الموسمية.

المراجع والمصادر العربية

1. الرحلي، أمينة عطا الله عبد ربه. (2024). التحليل المكاني للعواصف الغبارية ومخاطرها على حركة النقل في الطرق بالمملكة العربية السعودية باستخدام الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية. **مجلة جامعة الملك عبد العزيز: علوم البيئة**، 15.45–25 ,(1) https://journals.kau.edu.sa/index.php/JEDS/article/view/1419/742
2. النافعي، أحمد عصام عبدالنبي حنون، و شنيشل، بلسم شاكر. (2022). الهباء الجوي وأثره في تباين قيم الإشعاع الشمسي في العراق للمدة (1989–2019). **مجلة الدراسات المستدامة**، 1017–1047.4 , http://search.mandumah.com/Record/1270513
3. التلاوي، حسين محمد حسن، عصفور، محمود عبداللطيف، و بشارة، عايدة نسيم. (1983). المناخ وأثره على البيئة في صحراء مصر الغربية: دراسة كارتوجرافية (رسالة ماجستير غير منشورة). **جامعة عين شمس، القاهرة.** http://search.mandumah.com/Record/873777
4. الحسناوي، أسعد شهيد محمد. (2015). دراسة كمية ونوعية لغبار مدينة كربلاء وتقييم قدرة التحمل والمعالجة لبعض النباتات (أطروحة دكتوراه غير منشورة). **جامعة كربلاء، كلية التربية للعلوم الصرفة، قسم علوم الحياة.** https://uokerbala.edu.iq/wp-content/uploads/2020/07/Rp-Quantitative-and-qualitative-study-for-Kerbala-city-dust-and-assessment-the-tolerance-ability-and-treatment-for-some-plants.pdf
5. سالم، طارق زكريا إبراهيم. (2011). تحقيق التلاؤم الحراري في الصحراء الغربية المصرية: دراسة في المناخ التطبيقي. **المجلة الجغرافية العربية**، 271.43–231 ,(57) http://search.mandumah.com/Record/877035
6. عبد الله، فاطمة فتحي محمد، &طلبة، شحدة سيد أحمد. (2021). الظواهر المناخية التي تعوق الرؤية الأفقية في مصر وتأثيرها على الحوادث المرورية بالطرق السريعة خلال الفترة (2000–2017): دراسة في المناخ التطبيقي. **المجلة الجغرافية المصرية** http://agj.journals.ekb.eg/article_211664_6f812b956b8cad47242d05be2d824865.pdf
7. مبروك، سامية علي. (2021). تأثير العواصف الرملية والترابية على النقل الجوي في مصر: دراسة في المناخ التطبيقي. **مجلة القراءة والمعرفة، 235، القاهرة.** http://mrk.journals.ekb.eg/article_166328_6d9350b2a08524447ddf9029bdd59a5e.pdf
8. موقع العين الإخباري. صورة لعاصفة غبارية في محافظة الوادي الجديد بتاريخ 11 أغسطس 2024. https://cdn.al-ain.com/lg/images/2024/8/11/196-132833-new-valley-storm-2.jpeg

المراجع الاجنبية:

1. Ashrafi, K., Shafiepour-Motlagh, M., Aslemand, A., & Ghader, S. (2014). Dust storm simulation over Iran using HYSPLIT. *Journal of Environmental Health Science & Engineering, 12*, 9. https://doi.org/10.1186/2052-336X-12-9
2. Awadh, S. M. (2023). Impact of North African sand and dust storms on the Middle East using Iraq as an example: Causes, sources, and mitigation. *Atmosphere, 14*(1), 180. https://doi.org/10.3390/atmos14010180
3. Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS). (2020). CAMS global reanalysis (EAC4) [Dataset]. ECMWF. https://ads.atmosphere.copernicus.eu/datasets/cams-global-reanalysis-eac4
4. Dawoud, W., El Kenawy, A. M., Abdel Wahab, M. M., & Oraby, A. H. (2023). Temporal variability of particulate matter and black carbon concentrations over Greater Cairo and its atmospheric drivers. *Climate, 11*(7), 133. https://doi.org/10.3390/cli11070133
5. El-Metwally, M., Alfaro, S. C., Abdel Wahab, M. M., & Chatenet, B. (2008). Seasonal and inter-annual variability of the aerosol content in Cairo (Egypt) as retrieved from Sun-photometer measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 113*(D14), D14219. https://doi.org/10.1029/2008JD009834
6. El-Metwally, M., Alfaro, S. C., Abdel Wahab, M. M., Favez, O., Mohamed, Z., & Chatenet, B. (2011). Aerosol properties and associated radiative effects over Cairo (Egypt). *Atmospheric Research, 99*(2–3), 263–276. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.10.017
7. Fenhua, & Guan. (2018). Seasonal Variations of Aerosol Optical Depth over East China and India in Relationship to the Asian Monsoon Circulation. *J. Meteor. Res.*, 32.
8. Georgoulias, A. K., Alexandri, G., Kourtidis, K. A., et al. (2016). Spatiotemporal variability and contribution of different aerosol types to the aerosol optical depth over the Eastern Mediterranean. *Atmospheric Chemistry and Physics, 16*(21), 13853–13884. https://doi.org/10.5194/acp-16-13853-2016
9. Goudie, A. S. (2014). Desert dust and human health disorders. *Environment International, 63*, 101–113. https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.10.011
10. Hamzeh, N. H., Karami, S., Kaskaoutis, D. G., Tegen, I., Moradi, M., & Opp, C. (2021). Atmospheric dynamics and

numerical simulations of six frontal dust storms in the Middle East region. *Atmosphere, 12*(1), 125. https://doi.org/10.3390/atmos12010125

11. Jiawei, & Zhiwei. (2012). A Modeling Study of Seasonal Variation of Atmospheric Aerosols over East Asia. *Adv. Atmos. Sci.*, 29(1), 101–117.
12. Lwin, K. S. (2023). Effects of desert dust and sandstorms on human health: A scoping review. *GeoHealth, 7*(7), e2022GH000728. https://doi.org/10.1029/2022GH000728
13. Mahowald, N. M., Scanza, R., Brahney, J., Goodale, C. L., Hess, P. G., Moore, J. K., & Neff, J. (2017). Aerosol deposition impacts on land and ocean carbon cycles. *Current Climate Change Reports, 3*(1), 16–31. https://doi.org/10.1007/s40641-017-0056-z
14. Middleton, N. J. (2017). Desert dust hazards: A global review. *Aeolian Research, 24*, 53–63. https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2016.12.001
15. Prasad, A. K., et al. (2010). Implications of high-altitude desert dust transport from Western Sahara to Nile Delta during biomass burning season. *Environmental Pollution, 158*, 3385–3391.
16. Prospero, J. M., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S. E., & Gill, T. E. (2002). Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust. *Reviews of Geophysics, 40*(1), 1002. https://doi.org/10.1029/2000RG000095
17. Tong, D., Feng, I., Gill, T. E., Schepanski, K., & Wang, J. (2023). How many people were killed by windblown dust events in the United States? *Bulletin of the American Meteorological Society, 104*(5), E1067–E1082. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-22-0186.1
18. Wang, et al. (2020). The impact of Sahara dust on air quality and public health in European countries. *Atmospheric Environment, 241*, 117771. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117771