

النمذجة الزمكانية لعلاقة مؤشرات الغطاء النباتي والرطوبة بكثافة الغبار الجوي في محافظة كركوك للمدة (١٩٩٣-٢٠٢٥)

م.د. ماجد عبدالله فاضل سبع

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي / جامعة كركوك / كلية التربية للبنات

Spatiotemporal Modeling of the Relationship Between Vegetation Indices, Soil Moisture, and Atmospheric Dust Density in Kirkuk Governorate for the Period (1993–2025)□

Dr. Majid Abdullah Fadil

University of Kirkuk / College of Education for Women

majid_abdullah@uo.kirkuk.edu.iq□

المخلص

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل العلاقة الزمكانية بين مؤشرات الغطاء النباتي ورطوبة التربة وكثافة الغبار الجوي في محافظة كركوك خلال المدة (١٩٩٣-٢٠٢٥)، باستخدام بيانات الاستشعار عن بعد وتقنيات نظم المعلومات الجغرافية. تم اعتماد مؤشر الغطاء النباتي (NDVI) ورطوبة التربة لتمثيل خصائص سطح الأرض، في حين استُخدم العمق البصري للهباء الجوي (AOD) كمؤشر لقياس كثافة الغبار. اعتمدت الدراسة على معالجة البيانات مكانياً وزمانياً، وتصنيف السنوات إلى أنماط مناخية (رطبة، معتدلة، جافة)، واختيار سنوات نموذجية لتمثيل هذا التباين، بالإضافة إلى تحليل التوزيع المكاني وتطبيق الأساليب الإحصائية، بما في ذلك معامل الارتباط والانحدار الخطي. أظهرت النتائج وجود تباين واضح في المؤشرات المدروسة، حيث سجل الغطاء النباتي ورطوبة التربة أعلى قيمهما في السنة الرطبة، في حين انخفضت بشكل ملحوظ في السنة الجافة، بالتزامن مع ارتفاع كثافة الغبار. كما أظهرت النتائج وجود علاقة عكسية قوية بين NDVI وكثافة الغبار ($r = -0.85$)، وكذلك بين رطوبة التربة والغبار ($r = -0.86$)، مقابل علاقة طردية قوية بين الغطاء النباتي والرطوبة ($r = 0.99$). كما بين نموذج الانحدار أن المتغيرات المستقلة تقسّر نحو ٧٣٪ من التباين في كثافة الغبار ($R^2 = 0.73$). وتؤكد النتائج أن تدهور الغطاء النباتي وانخفاض رطوبة التربة يسهمان بشكل مباشر في زيادة نشاط الغبار الجوي. تخلص الدراسة إلى أن التكامل بين التحليل الزمكاني والنمذجة الإحصائية يوفر فهماً أعمق للعلاقات البيئية المتكاملة في الغبار الجوي، مما يسهم في دعم إدارة الموارد الطبيعية والحد من المخاطر البيئية في المناطق الجافة وشبه الجافة. الكلمات الدالة: الغطاء النباتي (NDVI)، رطوبة التربة، الغبار الجوي (AOD)، التحليل الزمكاني، الاستشعار عن بعد، النمذجة الإحصائية، محافظة كركوك.

Abstract

This study aims to analyze the spatiotemporal relationship between vegetation indices, soil moisture, and atmospheric dust density in Kirkuk Governorate during the period (1993–2025), using remote sensing data and Geographic Information Systems (GIS) techniques. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and soil moisture were employed to represent land surface characteristics, while Aerosol Optical Depth (AOD) was used as an indicator of atmospheric dust density. The study methodology involved spatial and temporal data processing, classification of years into climatic patterns (wet, moderate, and dry), and the selection of representative years to capture this variability. In addition, spatial distribution analysis and statistical methods, including correlation analysis and linear regression, were applied to determine the relationships among variables. The results revealed significant variability in the studied indicators, with vegetation cover and soil moisture reaching their highest values during the wet year and declining markedly during the dry year, coinciding with a substantial increase in dust density. The findings also indicated a strong inverse relationship between NDVI and dust density ($r = -0.85$), as well as between soil moisture and dust ($r = -0.86$), alongside a

strong positive relationship between vegetation and soil moisture ($r = 0.99$). Furthermore, the regression model showed that the independent variables explain approximately 73% of the variation in dust density ($R^2 = 0.73$). The results confirm that vegetation degradation and reduced soil moisture contribute directly to increased dust activity. The study concludes that integrating spatiotemporal analysis with statistical modeling provides a deeper understanding of environmental interactions controlling atmospheric dust, thereby supporting natural resource management and reducing environmental risks in arid and semi-arid regions. **Keywords** NDVI, Soil Moisture, Aerosol Optical Depth (AOD), Spatiotemporal Analysis, Remote Sensing, Statistical Modeling, Kirkuk

المقدمة:

تُعد العواصف الغبارية من الظواهر البيئية المعقدة التي تحظى باهتمام متزايد على المستويين العالمي والإقليمي، لما لها من تأثيرات مباشرة وغير مباشرة في جودة الهواء والصحة العامة والأنشطة الاقتصادية واستدامة الموارد الطبيعية. وتزداد حدة هذه الظاهرة في المناطق الجافة وشبه الجافة، التي تتميز بحساسية عالية للتغيرات المناخية وتدهور الغطاء الأرضي، مما يجعلها بيئات ملائمة لنشوء وانتشار الغبار الجوي (Prospero et al., 2002, p2-4). وقد أشارت العديد من الدراسات إلى أن ديناميكيات الغبار الجوي لا ترتبط بالعوامل المناخية وحدها، بل تتأثر أيضاً بمجموعة من العوامل السطحية، وفي مقدمتها الغطاء النباتي ورطوبة التربة، اللذان يمثلان عنصرين رئيسيين في التحكم باستقرار التربة وقابليتها للتعرية، إذ يسهم الغطاء النباتي في تقليل سرعة الرياح عند سطح الأرض وتثبيت التربة، في حين تؤدي رطوبة التربة إلى زيادة تماسك الجزيئات السطحية، مما يقلل من احتمالية انبعاث الغبار (Reynolds et al., 2007, p847). يُعد مؤشر الغطاء النباتي المعياري (NDVI) من أهم الأدوات المستخدمة في تقييم الحالة النباتية ومراقبة التغيرات البيئية، حيث يعكس النشاط الحيوي للنباتات واستجابتها للتغيرات المناخية، خاصة الأمطار ودرجة الحرارة (نجيبان، ٢٠٢١، ص ٦)، كما تُعد بيانات رطوبة التربة من المؤشرات الأساسية التي تعكس التفاعل بين الغلاف الجوي وسطح الأرض، وتلعب دوراً مهماً في تفسير التباين في الغطاء النباتي والعمليات الهيدرولوجية (Entekhabi et al., 2010, p706). أما فيما يتعلق بالغبار الجوي، فإن العمق البصري للهباء الجوي (AOD) يمثل مؤشراً كمياً معتمداً لقياس تركيز الجسيمات العالقة في الغلاف الجوي، وقد أتاح تطور تقنيات الاستشعار عن بعد إمكانية تتبع التغيرات الزمكانية لهذا المؤشر بدقة عالية، وربطه بالعوامل البيئية المختلفة (Kaufman et al., 2002, p215). وعلى الرغم من التقدم في هذا المجال، إلا أن معظم الدراسات السابقة تناولت هذه المتغيرات بشكل منفصل أو ضمن نطاقات زمنية قصيرة، دون التركيز على التحليل المتكامل للعلاقة بين الغطاء النباتي ورطوبة التربة وكثافة الغبار ضمن إطار زمني طويل الأمد، خاصة في المناطق الانتقالية التي تتسم بتباين مناخي واضح. وتُعد محافظة كركوك من المناطق التي تتميز بخصوصية بيئية ومناخية، إذ تقع ضمن نطاق انتقالي بين المناخ شبه الجاف والجاف، مما يجعلها عرضة لتقلبات مناخية تؤثر بشكل مباشر في الغطاء النباتي ورطوبة التربة، وبالتالي في نشاط العواصف الغبارية. ومن هنا، تأتي أهمية هذه الدراسة في محاولة سد الفجوة المعرفية من خلال تحليل العلاقة التكاملية بين هذه المتغيرات باستخدام بيانات الاستشعار عن بعد، وبالإعتماد على منهج يجمع بين التحليل الزمكاني والنمذجة الإحصائية، بهدف الوصول إلى فهم أعمق لديناميكيات الغبار الجوي في منطقة الدراسة.

أولاً. مشكلة البحث:

على الرغم من وجود العديد من الدراسات التي تناولت العواصف الغبارية، إلا أن معظمها ركز على العوامل المناخية بشكل منفصل، دون إعطاء الاهتمام الكافي للتفاعل المتكامل بين الغطاء النباتي ورطوبة التربة وتأثيرهما المشترك في كثافة الغبار الجوي، كما أن الدراسات التطبيقية التي تجمع بين التحليل الزمكاني والنمذجة الإحصائية باستخدام بيانات الاستشعار عن بعد ما تزال محدودة، خاصة على مستوى الدراسات المحلية في محافظة كركوك. وعليه، تتمثل مشكلة البحث في: - ما طبيعة العلاقة الزمكانية بين الغطاء النباتي ورطوبة التربة وكثافة الغبار الجوي في محافظة كركوك خلال المدة (١٩٩٣-٢٠٢٥)؟. ومنها تنبثق التساؤلات الثانوية:

١. ما مدى تأثير التغير في الغطاء النباتي في زيادة أو انخفاض كثافة الغبار الجوي؟
٢. كيف تسهم رطوبة التربة في التحكم باستقرار التربة وتقليل انبعاث الغبار؟
٣. ما طبيعة العلاقة الإحصائية بين المتغيرات، وهل يمكن نمذجتها كمياً؟
٤. هل يؤدي التباين المناخي إلى إعادة تشكيل الأنماط المكانية للغبار الجوي؟

٥.

ثانياً. فرضية البحث:

ينطلق البحث من الفرضية الرئيسية الآتية: توجد علاقة عكسية ذات دلالة بين كل من الغطاء النباتي ورطوبة التربة من جهة، وكثافة الغبار الجوي من جهة أخرى، حيث يؤدي انخفاض الغطاء النباتي والرطوبة إلى زيادة نشاط الغبار. وتتفرع عنها الفرضيات الثانوية:-

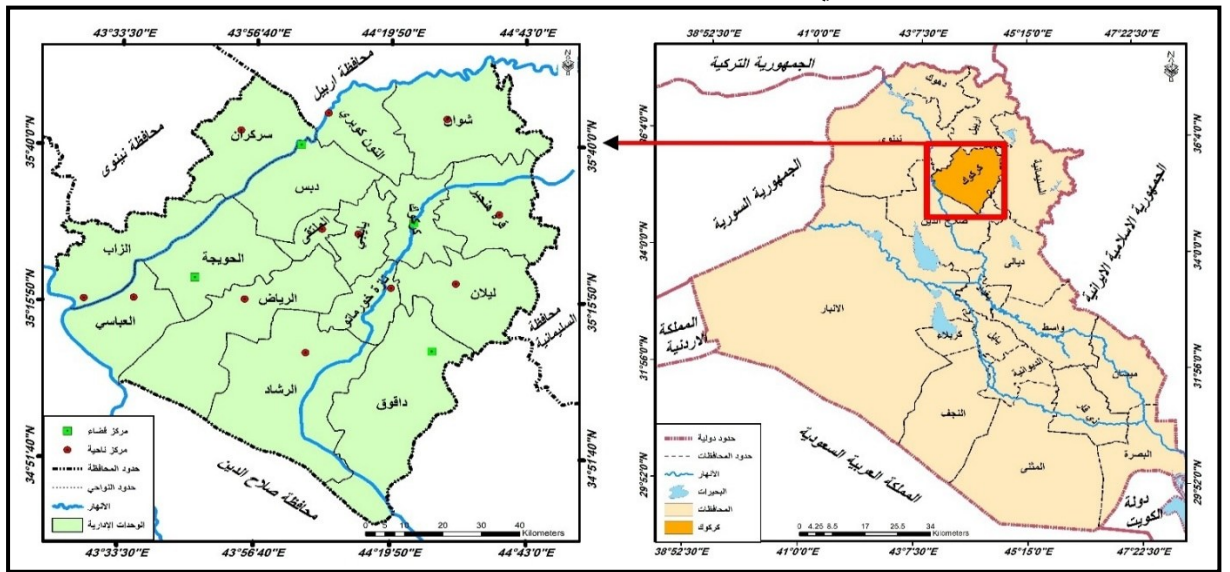
١. يوجد ارتباط طردي قوي بين الغطاء النباتي ورطوبة التربة
٢. يزداد الغبار في السنوات الجافة مقارنة بالسنوات الرطبة
٣. يمكن تفسير التباين في كثافة الغبار من خلال نماذج إحصائية تعتمد على NDVI ورطوبة التربة.

ثالثاً. أهداف البحث:

١. تحليل التباين الزمكاني لمؤشرات الغطاء النباتي ورطوبة التربة وكثافة الغبار الجوي في محافظة كركوك.
٢. تصنيف الأنماط المناخية واختيار سنوات نموذجية (رطبة، معتدلة، جافة) لدراسة سلوك المتغيرات.
٣. تحديد أنماط التوزيع المكاني لكل من NDVI ورطوبة التربة و AOD.
٤. تحليل العلاقة الإحصائية بين المتغيرات باستخدام معامل الارتباط والانحدار الخطي.
٥. بناء نموذج تفسيري يوضح تأثير الغطاء النباتي ورطوبة التربة في ديناميكيات الغبار الجوي.

رابعاً. الحدود المكانية والزمانية للدراسة.

أ- **الحدود المكانية:** تمثلت بالحدود الإدارية لمحافظة كركوك، الواقعة فلكياً بين دائرتي عرض (٣٦°٠٠' - ٣٤°٥٥') شمالاً، وخطي طول (٤٣°٢٥' - ٤٤°٤٤') شرقاً، إذ يحدها من الشمال محافظة أربيل ومن الشرق والشمال الشرقي محافظة السليمانية ومن الجنوب والجنوب الشرقي والغرب محافظة صلاح الدين ومن الشمال الغربي محافظة نينوى ما يمنحها موقعاً محورياً ضمن شبكة الاتصال الإقليمي في العراق (وزارة التخطيط، ٢٠٢١، ص ٧٣). ويمثل هذا الموقع بيئة انتقالية تتداخل فيها الخصائص المناخية والهيدرولوجية، مما يجعلها منطقة مناسبة لدراسة التباين في المؤشرات البيئية المرتبطة بالغطاء النباتي وكثافة الغبار الجوي. ينظر الخريطة (١). **خريطة (١) موقع منطقة الدراسة**



المصدر: اعتماداً على: جمهورية العراق، الهيئة العامة للمساحة، خريطة العراق الإدارية بمقياس ١/٥٠٠٠٠٠، ومخرجات برنامج نظم المعلومات الجغرافية (Arc GIS 10.8).

ب- **الحدود الزمانية:** تمثلت الحدود الزمانية بالمدة الممتدة من عام ١٩٩٣ إلى عام ٢٠٢٥، وذلك بهدف تحليل التغيرات الزمانية طويلة الأمد في مؤشرات الغطاء النباتي ورطوبة التربة وكثافة الغبار الجوي، مع اعتماد سنوات نموذجية (رطبة، معتدلة، جافة) لتمثيل التباين المناخي خلال فترة الدراسة.

خاصةً. آلية العمل والمنهجية العامة للبحث:

اعتمدت هذه الدراسة على منهج تحليلي زمكاني قائم على تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية، بهدف نمذجة العلاقة بين مؤشرات الغطاء النباتي ورطوبة التربة وكثافة الغبار الجوي في محافظة كركوك خلال المدة (١٩٩٣-٢٠٢٥). وذلك وفقاً للخطوات المنهجية التالية-

١. جمع البيانات (Data Acquisition) تم استخدام بيانات متعددة المصادر شملت بيانات الاستشعار عن بعد والبيانات المناخية، حيث تم الحصول على مؤشر الغطاء النباتي (NDVI) الذي يعكس الحالة الحيوية للغطاء النباتي، وبيانات رطوبة التربة التي تمثل المحتوى المائي في الطبقة السطحية للتربة، فضلاً عن بيانات العمق البصري للغبار الجوي (AOD) كمؤشر على كثافة الغبار في الغلاف الجوي. كما تم الاعتماد على بيانات الأمطار السنوية لتحليل التباين المناخي خلال فترة الدراسة. وقد تم اختيار هذه المتغيرات لتمثل النظام البيئي-المناخي المتحكم في نشوء وتطور العواصف الغبارية، حيث يعكس الغطاء النباتي والرطوبة حالة سطح الأرض، في حين يعكس AOD شدة الغبار في الجو.

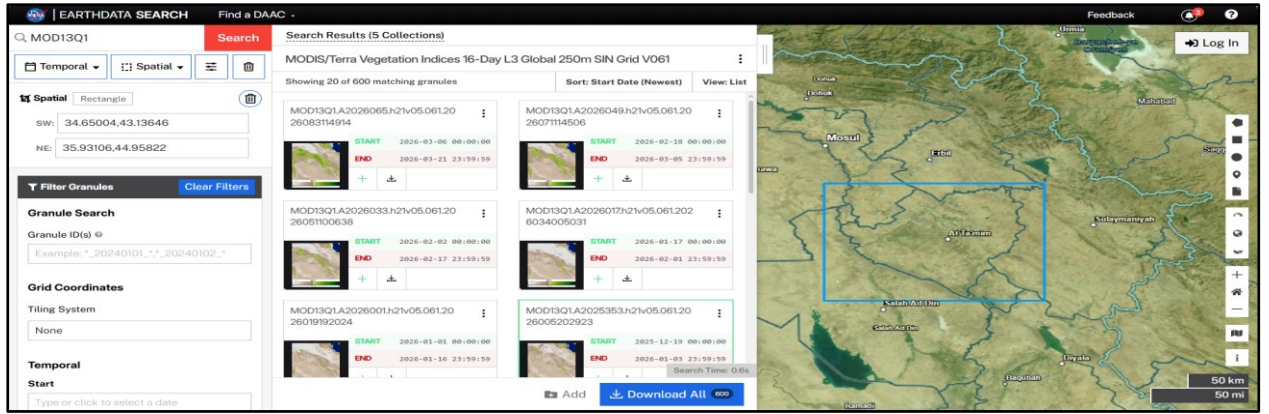
٢. المعالجات المسبقة (Pre-processing) خضعت جميع البيانات إلى سلسلة من المعالجات المسبقة لضمان تجانسها وقابليتها للتحليل المقارن، حيث تم إجراء إعادة الإسقاط الجغرافي لتوحيد النظام الإحداثي، وقص البيانات وفق حدود منطقة الدراسة (محافظة كركوك)، فضلاً عن توحيد الدقة المكانية بين مختلف مصادر البيانات، كما تم تنفيذ عمليات التجميع الزمني (Temporal Aggregation) لتحويل البيانات ذات التكرار العالي إلى متوسطات سنوية، بهدف تقليل التذبذب الزمني والتركيز على الاتجاهات العامة للمتغيرات خلال فترة الدراسة.

٣. تصنيف الأنماط المناخية واختيار السنوات النموذجية (Climate Classification and Representative Years) تم تحليل بيانات الأمطار السنوية لتحديد التباين المناخي خلال فترة الدراسة، حيث تم تصنيف السنوات إلى ثلاث فئات رئيسية هي السنوات الجافة والمعتدلة والرطبة، اعتماداً على الانحراف عن المعدل العام للأمطار. وبعد عملية التصنيف، تم اختيار سنوات ممثلة لكل نمط مناخي، حيث اعتُمدت سنة (١٩٩٣) كسنة رطبة، وسنة (٢٠١٤) كسنة معتدلة، وسنة (٢٠٢٥) كسنة جافة. وقد تم اختيار هذه السنوات بوصفها سنوات نموذجية (Representative Years) تعكس الخصائص المناخية لكل فئة، بهدف إجراء تحليل مكاني تفصيلي للمتغيرات المدروسة تحت ظروف مناخية متباينة، ويهدف هذا الأسلوب إلى تقليل التعقيد الزمني والتركيز على التباين المكاني، مع الحفاظ على تمثيل واضح لتأثير الأنماط المناخية المختلفة.

٤. استخراج المتغيرات (Variable Extraction) تم استخراج مؤشر الغطاء النباتي (NDVI) باعتباره من أهم المؤشرات الطيفية المستخدمة في تقييم الحالة النباتية، وذلك وفق المعادلة (زرزور ومحمد، ٢٠٢٦، ص ١١٦٥):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

حيث يمثل NIR الانعكاس في نطاق الأشعة تحت الحمراء القريبة، و RED الانعكاس في النطاق الأحمر، وتعكس قيم المؤشر كثافة وحيوية الغطاء النباتي. أما رطوبة التربة، فقد تم الاعتماد على بيانات الأقمار الصناعية الجاهزة التي توفر قياسات مباشرة للمحتوى المائي في التربة، دون الحاجة إلى اشتقاقها بمعادلات طيفية، في حين تم استخدام العمق البصري للغبار الجوي (AOD) كمؤشر كمي يعكس تركيز الجسيمات العالقة في الغلاف الجوي، وبالتالي يمثل شدة الغبار. وفي هذه الدراسة تم الاعتماد على بيانات الأقمار الصناعية المتاحة عبر منصة Earthdata التابعة لوكالة ناسا، وبالتحديد منتج (Terra NDVI) MOD13Q1 الذي يوفر بيانات مؤشر NDVI بدقة مكانية تبلغ نحو ٢٥٠ متر وبفاصل زمني ١٦ يوماً. وقد تم تحميل المرئيات الخاصة بمنطقة الدراسة لكل سنة من سنوات المدة (١٩٩٥-٢٠٢٥)، وكما في الشكل (١) وبذلك تم الحصول على سلسلة زمنية طويلة من صور NDVI بلغ عددها ثلاث مرئيات، جرى استخدامها لتحليل التغيرات الزمكانية الخاصة بالدراسة (Didan, K, 2021). وبغية إبراز التباين المكاني للغطاء النباتي المرتبط بظروف الجفاف والرطوبة، تم اختيار ثلاث سنوات تمثل أنماطاً مناخية مختلفة، وهي السنة الرطبة والسنة المعتدلة والسنة الجافة اعتماداً على نتائج مؤشر الهطول القياسي (SPI). وتُختتم آلية العمل بإنتاج خرائط زمكانية. شكل (١) إليه تحميل مرئيات الجفاف النباتي للفترة ١٩٩٣-٢٠٢٥



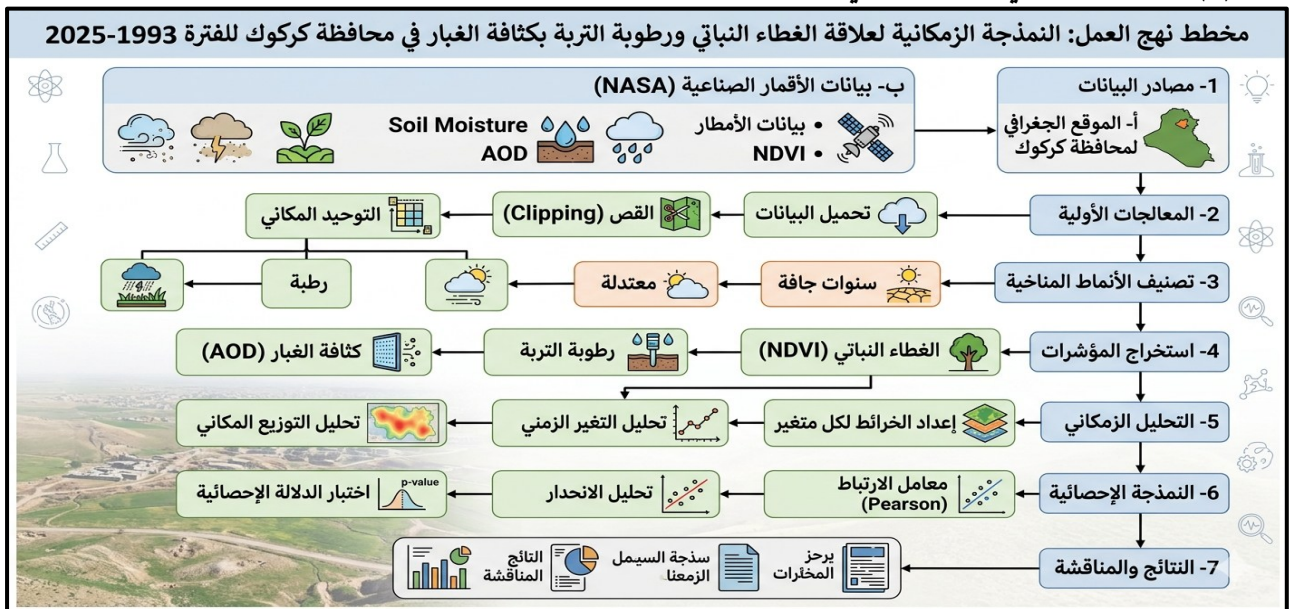
<https://earthexplorer.usgs.gov>

٥. التحليل الزمكاني (Spatiotemporal Analysis) تم إجراء تحليل زمكاني للمتغيرات الثلاثة من خلال إنتاج خرائط مكانية لكل من الغطاء النباتي ورطوبة التربة وكثافة الغبار، فضلاً عن تحليل التغيرات الزمنية المرتبطة بالسنوات النموذجية المختارة. كما تم مقارنة الأنماط المكانية بين السنوات الرطبة والمعتدلة والجافة، بهدف الكشف عن تأثير التباين المناخي في توزيع الغطاء النباتي والرطوبة، وانعكاس ذلك على كثافة الغبار الجوي داخل منطقة الدراسة.

٦. النمذجة الإحصائية (Statistical Modeling) تم تحليل العلاقة بين المتغيرات باستخدام الأساليب الإحصائية، حيث اعتُبر كل من الغطاء النباتي (NDVI) ورطوبة التربة متغيرات مستقلة، في حين مثّلت كثافة الغبار الجوي (AOD) المتغير التابع. تم استخدام معامل الارتباط (Pearson) لتحديد قوة واتجاه العلاقة بين المتغيرات فضلاً عن تطبيق نموذج الانحدار الخطي المتعدد لتقدير تأثير كل من الغطاء النباتي والرطوبة في تغير كثافة الغبار.

٧. تفسير النتائج (Interpretation) تم تفسير النتائج في ضوء التباين المناخي والخصائص البيئية لمنطقة الدراسة، مع تحليل كيفية تأثير التغير في الغطاء النباتي ورطوبة التربة على كثافة الغبار الجوي، وربط النتائج بالأنماط المناخية المختلفة (الرطوبة، المعتدلة، الجافة)، وقد أتاح هذا النهج فهماً متكاملاً لديناميكيات الغبار الجوي وعلاقته بالمتغيرات البيئية، ضمن إطار زمني ومكاني واضح. وكما في الشكل (٢).

شكل (٢) المخطط التفصيلي لألية العمل في البحث



المصدر: اعتماداً على خطوات البحث المنهجية باستخدام الكفاءة الاصطناعي.

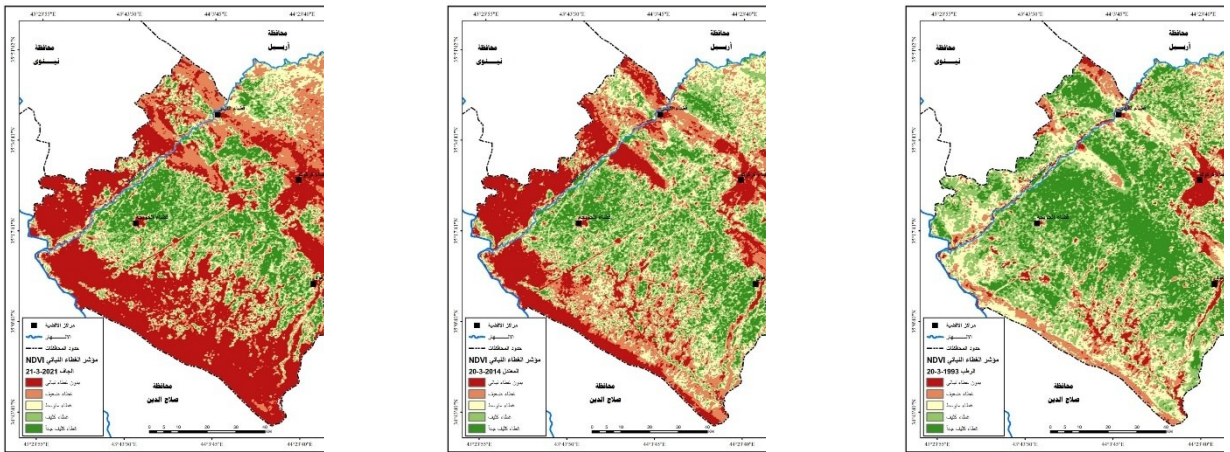
أنماط التوزيع المكاني والتغير الزمني للمؤشرات المختارة في محافظة كركوك

يُعد تحليل الأنماط الزمكانية للمؤشرات البيئية خطوة أساسية لفهم ديناميكيات التفاعل بين الغطاء النباتي ورطوبة التربة وكثافة الغبار الجوي، ولا سيما في المناطق ذات التباين المناخي الواضح. إذ تعكس هذه المؤشرات استجابة سطح الأرض للتغيرات المناخية، وتُظهر في الوقت نفسه تأثير هذه التغيرات في استقرار التربة وانبعثات الغبار. لذا يهدف هذا المحور إلى تحليل أنماط التوزيع المكاني والتغير الزمني لكل من مؤشر الغطاء

النباتي (NDVI)، ورطوبة التربة، وكثافة الغبار الجوي (AOD)، وذلك بالاعتماد على السنوات المناخية النموذجية المختارة (الرطبة، المعتدلة، الجافة). ويسهم هذا التحليل في الكشف عن التباينات المكانية والاتجاهات الزمنية لهذه المتغيرات، فضلاً عن تحديد المناطق الأكثر عرضة لتدهور الغطاء النباتي وزيادة النشاط الغباري كالاتي.

١. التوزيع المكاني والتغير الزمني للغطاء النباتي (NDVI). يُعد مؤشر الغطاء النباتي المعياري (NDVI) من أكثر المؤشرات الطيفية استخداماً في دراسات الاستشعار عن بعد لتقييم حالة الغطاء النباتي وكثافته، حيث يعتمد على الفرق بين انعكاسية الأشعة تحت الحمراء القريبة (NIR) والنطاق الأحمر (RED)، مما يجعله حساساً للنشاط الحيوي للنباتات. وقد أثبتت الدراسات أن قيم NDVI ترتبط بشكل مباشر بكمية الكتلة الحيوية وكفاءة التمثيل الضوئي، كما تعكس استجابة الغطاء النباتي للتغيرات المناخية، خاصة الأمطار ودرجة الحرارة (Pettorelli et al., 2005). لذلك، يُستخدم هذا المؤشر على نطاق واسع في تحليل الجفاف، ومراقبة تدهور الأراضي، ودراسة ديناميكيات النظم البيئية في المناطق الجافة وشبه الجافة. وفي هذا الإطار، يُعد NDVI مؤشراً مناسباً لفهم العلاقة بين الغطاء النباتي والعوامل البيئية المتكاملة في نشوء العواصف الغبارية، إذ يسهم الغطاء النباتي في تثبيت التربة وتقليل قابلية الجسيمات للانجراف. (علوان، ٢٠٢٤، ص ٤٧) يتضح من خلال خرائط الغطاء النباتي (٢ و ٣ و ٤) وبيانات الجدول (١) وجود تباين زمكاني واضح في توزيع وكثافة الغطاء النباتي بين السنوات المناخية الثلاث (الرطبة ١٩٩٣، المعتدلة ٢٠١٤، الجافة ٢٠٢١)، حيث يعكس هذا التباين استجابة مباشرة للظروف المناخية السائدة. ففي السنة الرطبة (١٩٩٣)، تُظهر الخرائط انتشاراً واسعاً للفئات ذات الكثافة النباتية العالية، خاصة في الأجزاء الوسطى والجنوبية الغربية من محافظة كركوك، حيث تتسم هذه المناطق بترابط مكاني واضح للغطاء النباتي. ويتوافق ذلك مع نتائج الجدول (١) التي تشير إلى أن فئات الغطاء المتوسط والكثيف والكثيف جداً تشكل ما يقارب ٧٦.٣٪ من المساحة الكلية، في حين لا تتجاوز نسبة المناطق الخالية من الغطاء النباتي ٧.٦٪، مما يعكس حالة من الاستقرار البيئي ووفرة الموارد المائية. أما في السنة المعتدلة (٢٠١٤)، فتظهر الخرائط تحولاً تدريجياً في النمط المكاني للغطاء النباتي، حيث يتراجع الامتداد المتصل للفئات الكثيفة، ويصبح أكثر تجزؤاً، مع توسع واضح للفئات المتوسطة والضعيفة، خاصة في الأطراف الجنوبية والشرقية. ويؤكد الجدول (١) هذا الاتجاه، إذ تنخفض نسبة الغطاء الكثيف والكثيف جداً إلى نحو ٣٢.٦٪، مقابل ارتفاع نسبة المناطق الضعيفة والخالية إلى حوالي ٤٤.٣٪، مما يعكس حالة انتقالية بين الاستقرار والتدهور البيئي نماذج كثافة الغطاء النباتي للأعوام (١٩٩٣-٢٠١٤-٢٠٢٥) في منطقة

الدراسة خريطة رقم (٢) النموذج الرطب خريطة رقم (٣) النموذج المعتدل خريطة رقم (٤) النموذج الجاف



المصدر: اعتماداً على موقع ناسا ضمن نموذج MOD13Q1، ومخرجات برنامج (Arc GIS V 10.8). جدول (١) مساحة ونسب كثافة الغطاء النباتي للأعوام (٢٠١٩-٢٠٢١-٢٠١٨) في منطقة الدراسة

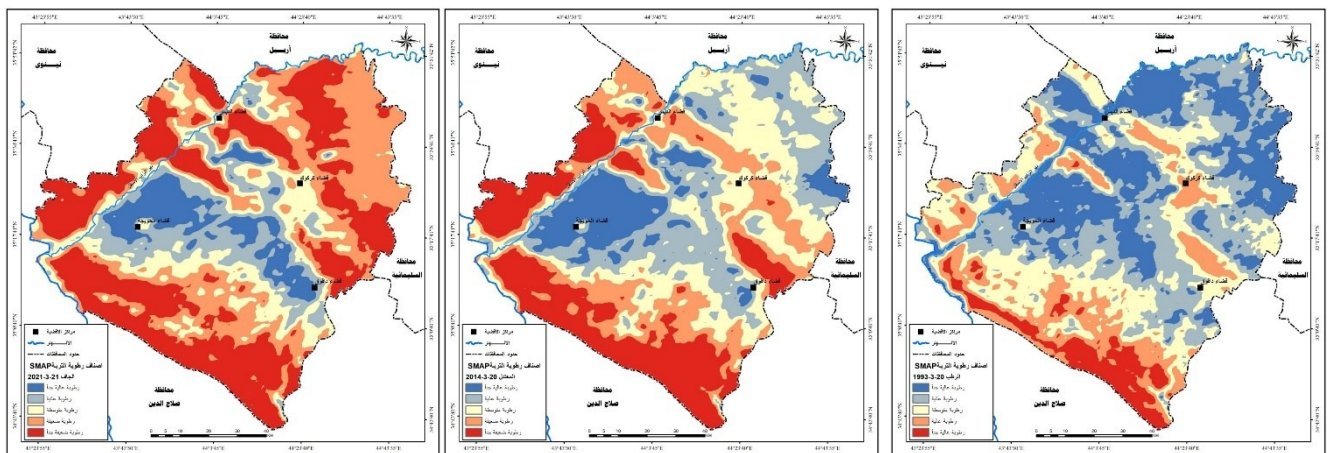
ت	الغطاء النباتي	1993 الرطب		2014 المعتدل		2021 الجاف	
		النسبة %	المساحة/كم ²	النسبة %	المساحة/كم ²	النسبة %	المساحة/كم ²
1	بدون غطاء نباتي	7.6	775.9	20.7	2111.5	37.1	3786.5
2	غطاء ضعيف	16.1	1637.8	23.6	2405.5	23.3	2375.3
3	غطاء متوسط	25.5	2601.0	23.1	2353.5	16.3	1658.5
4	غطاء كثيف	25.5	2605.9	19.4	1981.5	12.4	1269.8

10.9	1109.9	13.2	1347.9	25.3	2579.3	5	غطاء كثيف جداً
100.0	10199.9	100.0	10199.9	100.0	10199.9	6	المجموع

المصدر. من إعداد الباحث بالاعتماد على نماذج (٢, ٣, ٤) ومخرجات برنامج (Arc Gis 10,8). في حين تُظهر السنة الجافة (٢٠٢٥) تحولاً حاداً في بنية الغطاء النباتي، حيث تهيمن الفئات ذات الغطاء الضعيف والمناطق الخالية من الغطاء النباتي على مساحات واسعة، خاصة في الأجزاء الجنوبية والغربية، كما يتضح من الخرائط التي تُظهر اتساع هذه المناطق بشكل متصل. ويتوافق ذلك مع بيانات الجدول (١) التي تُظهر ارتفاع نسبة المناطق الخالية من الغطاء النباتي إلى ٣٧.١٪، وهي أعلى قيمة بين السنوات الثلاث، في حين تتخفف نسبة الغطاء الكثيف والكثيف جداً إلى نحو ٢٣.٣٪ فقط. ويُلاحظ أن الغطاء النباتي الكثيف في هذه السنة يقتصر على نطاقات محدودة ومجزأة، غالباً بالقرب من المجاري المائية أو المناطق الزراعية المروية، مما يشير إلى اعتماد الغطاء النباتي على مصادر مائية محدودة في ظل ظروف الجفاف. تشير هذه النتائج مجتمعة إلى أن الغطاء النباتي في منطقة الدراسة يتميز بحساسية عالية للتغيرات المناخية، حيث يؤدي توفر الرطوبة في السنوات الرطبة إلى زيادة الترابط المكاني وكثافة الغطاء النباتي، في حين يؤدي الجفاف إلى تفكك الغطاء النباتي (Vegetation Fragmentation) وزيادة المساحات المكشوفة. كما أن اتساع المناطق الخالية من الغطاء النباتي في السنة الجافة يعكس زيادة تعرض التربة لعوامل التعرية، خاصة الرياح، مما يعزز من احتمالية انبعاث الغبار. في المقابل، يسهم الغطاء النباتي الكثيف في تثبيت التربة وتقليل قابلية الجسيمات للانجراف، وبالتالي الحد من نشاط العواصف الغبارية. وبذلك، تؤكد النتائج أن الغطاء النباتي يمثل عاملاً حاسماً في التحكم باستقرار التربة وديناميكيات الغبار الجوي، وأن تدهوره تحت تأثير الجفاف يؤدي إلى زيادة المخاطر البيئية في منطقة الدراسة.

٢. التوزيع المكاني والتغير الزمني لرطوبة التربة. تُعد رطوبة التربة من أهم المتغيرات البيئية التي تعكس التفاعل بين الغلاف الجوي وسطح الأرض، إذ تمثل المحتوى المائي في الطبقة السطحية للتربة، وتلعب دوراً أساسياً في تنظيم العمليات الهيدرولوجية والنشاط النباتي. كما تُعد من العوامل الحاكمة في تحديد استقرار التربة وقابليتها للتعرية، خاصة في المناطق الجافة وشبه الجافة، وقد أكدت العديد من الدراسات أن رطوبة التربة ترتبط ارتباطاً وثيقاً بالغطاء النباتي، حيث تسهم في دعم نمو النباتات وزيادة الكتلة الحيوية، في حين يؤدي انخفاضها إلى تدهور الغطاء النباتي وزيادة تعرض التربة للانكشاف (Dorigo et al., 2017, p215). كما تلعب رطوبة التربة دوراً مهماً في التحكم بانبعاث الغبار، إذ يؤدي انخفاضها إلى تقليل تماسك جزيئات التربة وزيادة قابليتها للحركة بفعل الرياح، مما يعزز من نشاط العواصف الغبارية. وفي هذا السياق، تتيح بيانات الأقمار الصناعية، مثل منتجات SMAP، إمكانية رصد التغيرات المكانية والزمانية في رطوبة التربة بدقة مناسبة، مما يجعلها أداة فعالة لدراسة ديناميكيات التربة وعلاقتها بالظواهر البيئية المختلفة. وعليه، فإن تحليل رطوبة التربة في هذه الدراسة يُعد خطوة أساسية لفهم دورها في تفسير التباين المكاني لكثافة الغبار الجوي، وعلاقتها بالتغيرات المناخية والغطاء النباتي في منطقة الدراسة. يتضح من خلال خرائط رطوبة التربة (٥ و ٦ و ٧) وبيانات الجدول (٢) وجود تباين زمكاني واضح في توزيع مستويات الرطوبة بين السنوات المناخية الثلاث (الرطوبة ١٩٩٣، المعتدلة ٢٠١٤، الجافة ٢٠٢١)، حيث يعكس هذا التباين التأثير المباشر للتغيرات المناخية، وخاصة كميات الأمطار، في المحتوى المائي للتربة.

نماذج رطوبة التربة للأعوام (١٩٩٣-٢٠١٤-٢٠٢٥) في منطقة الدراسة خريطة رقم (٥) النموذج الرطبة خريطة رقم (٦) النموذج المعتدل خريطة رقم (٧) النموذج الجاف



المصدر: اعتماداً على موقع ناسا ضمن نموذج *SMAP*، ومخرجات برنامج (Arc GIS V 10.8) جدول (٢) مساحة ونسب رطوبة التربة للأعوام (١٩٩٣-٢٠١٤-٢٠٢٥) في منطقة الدراسة

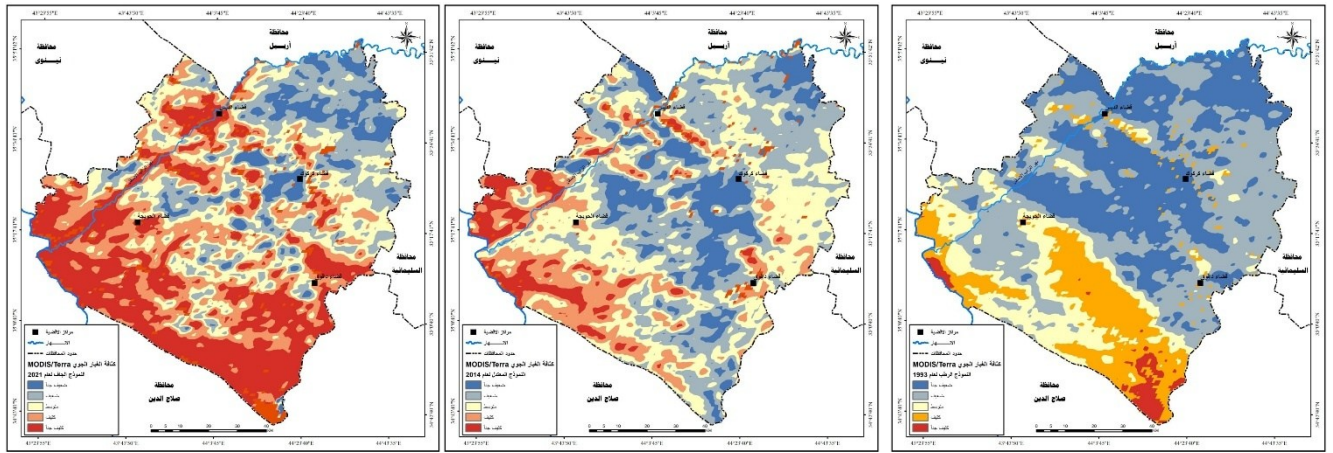
ت	أصناف الرطوبة	1993 الرطب		2014 المعتدل		2020 الجاف	
		النسبة %	المساحة/كم ²	النسبة %	المساحة/كم ²	النسبة %	المساحة/كم ²
1	رطوبة عالية جداً	26.9	2741.6	11.4	1159.7	8.6	879.2
2	رطوبة عالية	28.1	2868.8	22.1	2249.8	12.4	1269.8
3	متوسط	23.5	2399.9	24.4	2489.2	16.2	1649.6
4	ضعيفة	15.1	1539.8	19.9	2024.8	27.7	2821.9
5	ضعيفة جداً	6.4	649.7	22.3	2276.3	35.1	3579.3
6	المجموع	100.0	10199.9	100.0	10199.9	100.0	10199.9

المصدر. من إعداد الباحث بالاعتماد على نماذج (٥, ٦, ٧) ومخرجات برنامج (Arc Gis 10,8).

ففي السنة الرطبة (١٩٩٣)، تُظهر الخرائط انتشاراً واسعاً للفئات ذات الرطوبة العالية والعالية جداً، خاصة في الأجزاء الوسطى والجنوبية الغربية من منطقة الدراسة، والتي تمثل الامتداد الزراعي الرئيس والمناطق القريبة من المجاري المائية. ويتوافق ذلك مع بيانات الجدول (٢) التي تشير إلى أن هذه الفئات تشكل ما مجموعه نحو ٥٥٪ من المساحة الكلية، في حين لا تتجاوز نسبة المناطق ذات الرطوبة الضعيفة جداً ٦.٤٪، مما يعكس حالة من التشبع النسبي للتربة واستقرار النظام البيئي. أما في السنة المعتدلة (٢٠١٤)، فتظهر الخرائط تحولاً تدريجياً نحو انخفاض مستويات الرطوبة، حيث تتراجع الفئات ذات الرطوبة العالية، ويزداد انتشار الفئات المتوسطة والضعيفة، خاصة في الأطراف الجنوبية والشرقية. ويؤكد الجدول (٢) هذا الاتجاه، إذ تنخفض نسبة الرطوبة العالية والعالية جداً إلى نحو ٣٣.٥٪، مقابل ارتفاع الفئات الضعيفة والضعيفة جداً إلى حوالي ٤٢.٢٪، مما يعكس حالة انتقالية بين وفرة الرطوبة ونقصها. في حين تُظهر السنة الجافة (٢٠٢٥) تحولاً واضحاً نحو سيادة الظروف الجافة، حيث تهيمن الفئات ذات الرطوبة الضعيفة والضعيفة جداً على مساحات واسعة من منطقة الدراسة، خاصة في الأجزاء الجنوبية والغربية، كما يظهر ذلك بوضوح في الخرائط من خلال الاتساع الكبير للمناطق ذات الألوان الدالة على الجفاف. ويتوافق ذلك مع بيانات الجدول (٢) التي تُظهر ارتفاع هذه الفئات إلى نحو ٦٢.٨٪ من المساحة الكلية، في حين تنخفض نسبة الرطوبة العالية والعالية جداً إلى نحو ٢١٪ فقط. ويلاحظ أن المناطق التي تحتفظ بمستويات رطوبة مرتفعة في السنة الجافة تقتصر على نطاقات محدودة، غالباً في المناطق القريبة من الأنهار أو المناطق الزراعية المرورية، مما يشير إلى دور الموارد المائية السطحية والأنشطة البشرية في الحفاظ على الرطوبة المحلية. تشير هذه النتائج إلى وجود علاقة وثيقة بين التوزيع المكاني لرطوبة التربة والتباين المناخي، حيث يؤدي توفر الأمطار في السنوات الرطبة إلى زيادة المحتوى المائي للتربة واتساع المناطق الرطبة، في حين يؤدي الجفاف إلى تراجع هذه المناطق وزيادة الامتداد المكاني للمناطق الجافة. كما تعكس الزيادة الكبيرة في الفئات ذات الرطوبة الضعيفة في السنة الجافة ارتفاع قابلية التربة للتفكك وفقدان التماسك، مما يجعلها أكثر عرضة للتعرية الريحية. في المقابل، تسهم الرطوبة العالية في زيادة تماسك التربة وتقليل حركة الجسيمات الدقيقة، وبالتالي الحد من انبعاث الغبار. وبذلك، تؤكد النتائج أن رطوبة التربة تمثل عاملاً حاسماً في التحكم باستقرار التربة، وأن انخفاضها تحت تأثير الظروف الجافة يؤدي إلى تعزيز الظروف الملائمة لحدوث العواصف الغبارية، خاصة عند اقترانها بتدهور الغطاء النباتي.

٣. التوزيع المكاني والتغير الزمني لكثافة الغبار (AOD) يُعد العمق البصري للغبار الجوي (Aerosol Optical Depth – AOD) من أهم المؤشرات المستخدمة في دراسة تركيز الجسيمات العالقة في الغلاف الجوي، حيث يعكس مقدار تشتت وامتصاص الإشعاع الشمسي بفعل الهباء الجوي، بما في ذلك الغبار. ويُستخدم هذا المؤشر على نطاق واسع في تقييم شدة العواصف الغبارية وتوزيعها المكاني والزمني. وقد أظهرت الدراسات أن AOD يرتبط ارتباطاً وثيقاً بالظروف السطحية، خاصة الغطاء النباتي ورطوبة التربة، حيث يؤدي تدهور الغطاء النباتي وانخفاض الرطوبة إلى زيادة انبعاث الجسيمات الدقيقة وارتفاع قيم AOD (Kaufman et al., 2002, p215–223). كما تلعب الظروف المناخية، مثل الجفاف وقلة الأمطار، دوراً رئيساً في تعزيز نشاط الغبار، خاصة في المناطق الجافة وشبه الجافة. وعليه، يُعد تحليل AOD أداة أساسية لفهم ديناميكيات الغبار الجوي، وربطها بالعوامل البيئية المتكاملة في نشأته وانتشاره. يتضح من خلال خرائط كثافة الغبار (٨ و ٩ و ١٠) وبيانات الجدول (٣) وجود تباين مكاني وزماني واضح في توزيع شدة الغبار بين السنوات المناخية الثلاث (الرطوبة ١٩٩٣، المعتدلة ٢٠١٤، الجافة ٢٠٢٥)،

حيث يعكس هذا التباين تأثير التغيرات المناخية والبيئية في نشاط الغبار الجوي. ففي السنة الرطبة (١٩٩٣)، تُظهر الخرائط سيادة الفئات ذات الكثافة المنخفضة للغبار، خاصة في الأجزاء الشمالية والوسطى من منطقة الدراسة، حيث تنتشر القيم الضعيفة والضعيفة جداً بشكل واسع. ويتوافق ذلك مع بيانات الجدول (٣) التي تشير إلى أن هذه الفئات تشكل ما يقارب ٦٨.٤٪ من المساحة الكلية، في حين تبقى الفئات الكثيفة والكثيفة جداً محدودة (حوالي ١٦.٨٪ فقط)، وتتركز بشكل رئيس في الأجزاء الجنوبية والجنوبية الغربية. ويعكس هذا النمط تأثير الغطاء النباتي الكثيف وارتفاع رطوبة التربة في هذه السنة، مما يسهم في تثبيت التربة وتقليل انبعاث الغبار. نماذج كثافة الغبار الجوي للأعوام (١٩٩٣-٢٠١٤) في منطقة الدراسة خريطة رقم (٨) النموذج الرطب خريطة رقم (٩) النموذج المعتدل خريطة رقم (١٠) النموذج الجاف



المصدر: اعتماداً على موقع ناسا ضمن نموذج MOD04 ، ومخرجات برنامج (Arc GIS V 10.8) جدول (٣) مساحة ونسب كثافة الغبار الجوي للأعوام (١٩٩٣-٢٠١٤-٢٠٢٥) في منطقة الدراسة

ت	أصناف الغبار	1993 الرطب		2014 المعتدل		2021 الجاف	
		النسبة %	المساحة/كم ²	النسبة %	المساحة/كم ²	النسبة %	المساحة/كم ²
1	ضعيف جداً	30.5	3115.6	15.4	1565.7	9.7	989.3
2	ضعيف جداً	37.9	3869.1	32.2	3281.9	19.5	1989.7
3	متوسط	14.7	1498.8	30.3	3093.0	19.5	1990.4
4	كثيف	10.7	1091.5	15.7	1599.9	22.4	2287.6
5	كثيف جداً	6.1	624.9	6.5	659.5	28.9	2942.9
6	المجموع	100.0	10199.9	100.0	10199.9	100.0	10199.9

المصدر. من إعداد الباحث بالاعتماد على نماذج (٨, ٩, ١٠) ومخرجات برنامج (Arc Gis 10,8). أما في السنة المعتدلة (٢٠١٤)، فتُظهر الخرائط نمطاً انتقالياً، حيث تتراجع المساحات ذات الغبار الضعيف، ويزداد انتشار الفئات المتوسطة والكثيفة، خاصة في المناطق الوسطى والجنوبية. ويؤكد الجدول (٣) هذا الاتجاه، إذ تتخفف نسبة الغبار الضعيف والضعيف جداً إلى نحو ٤٧.٦٪، مقابل ارتفاع الفئات المتوسطة والكثيفة إلى حوالي ٥٢.٤٪. ويعكس هذا التحول بداية تأثير الظروف الجافة، حيث يؤدي انخفاض الرطوبة وتراجع الغطاء النباتي إلى زيادة نشاط الغبار، مع بقاء بعض المناطق مستقرة نسبياً. في حين تُظهر السنة الجافة (٢٠٢٥) تحولاً واضحاً نحو سيادة الظروف الغبارية، حيث تهيمن الفئات الكثيفة والكثيفة جداً على مساحات واسعة، خاصة في الأجزاء الجنوبية والغربية، كما يتضح من الخرائط التي تُظهر امتداداً واسعاً لهذه الفئات بشكل متصل. ويتوافق ذلك مع بيانات الجدول (٣) التي تُظهر ارتفاع نسبة الغبار الكثيف والكثيف جداً إلى نحو ٥١.٣٪، وهي أعلى قيمة بين السنوات الثلاث، في حين تتخفف نسبة الغبار الضعيف والضعيف جداً إلى نحو ٢٩.٢٪ فقط. كما يُلاحظ أن المناطق ذات الغبار المنخفض تتركز في نطاقات محدودة في الأجزاء الشمالية، حيث تتوافر نسبياً ظروف أفضل من حيث الرطوبة والغطاء النباتي. تشير هذه النتائج إلى وجود علاقة عكسية واضحة بين كثافة الغبار من جهة، وكل من الغطاء النباتي ورطوبة التربة من جهة أخرى، حيث يؤدي ارتفاع الغطاء النباتي والرطوبة في السنوات الرطبة إلى تقليل انبعاث الغبار، في حين يؤدي الجفاف إلى زيادة المساحات المكشوفة وارتفاع نشاط الغبار. كما أن التوسع المكاني للفئات الكثيفة في السنة الجافة يعكس حالة من عدم الاستقرار البيئي، حيث تصبح التربة

أكثر عرضة للتعرية الريحية نتيجة فقدان الغطاء النباتي وانخفاض تماسكها. وتؤكد هذه النتائج أن التغير في الظروف المناخية لا يؤثر فقط في توزيع الغبار، بل يعيد تشكيل النمط المكاني له، حيث تنتقل مناطق النشاط الغباري من نطاقات محدودة في السنوات الرطبة إلى مساحات واسعة ومتصلة في السنوات الجافة. يمكن الاستنتاج أن كثافة الغبار الجوي في منطقة الدراسة تتأثر بشكل مباشر بالتباين المناخي، حيث تتخفف في الظروف الرطبة وتزداد بشكل ملحوظ في الظروف الجافة. كما يؤكد التحليل أن الغطاء النباتي ورطوبة التربة يمثلان عاملين رئيسيين في التحكم في ديناميكيات الغبار، وأن تدهورهما يؤدي إلى زيادة المخاطر البيئية المرتبطة بالعواصف الغبارية.

٣. التحليل الإحصائي للعلاقة بين المتغيرات.

يُعد التحليل الإحصائي خطوة أساسية لتحديد طبيعة العلاقة بين المتغيرات البيئية، ولا سيما في الدراسات التي تهدف إلى تفسير الظواهر المعقدة مثل العواصف الغبارية. إذ يتيح هذا التحليل قياس قوة واتجاه العلاقة بين الغطاء النباتي ورطوبة التربة من جهة، وكثافة الغبار الجوي من جهة أخرى، بما يساهم في الانتقال من الوصف المكاني إلى التفسير الكمي. وفي هذا السياق، تم اعتماد معامل الارتباط (Pearson Correlation) لتحليل قوة العلاقة بين المتغيرات، إضافة إلى نموذج الانحدار الخطي المتعدد لتقدير تأثير المتغيرات المستقلة (NDVI ورطوبة التربة) في المتغير التابع (AOD).

٣-١. تحليل الارتباط (Correlation Analysis) لتحديد طبيعة العلاقة بين المتغيرات، تم تطبيق تحليل الارتباط والانحدار، حيث أظهرت نتائج الارتباط وجود علاقة عكسية قوية بين الغطاء النباتي وكثافة الغبار ($r = -0.85$)، حيث يشير انخفاض قيم NDVI إلى زيادة انبعاث الغبار، نتيجة تدهور الغطاء النباتي وزيادة المساحات المكشوفة. كما أظهرت النتائج وجود علاقة عكسية ماثلة بين رطوبة التربة وكثافة الغبار ($r = -0.86$)، حيث يؤدي انخفاض رطوبة التربة إلى تقليل تماسك الجسيمات السطحية، مما يزيد من قابليتها للانجراف بفعل الرياح. في المقابل، تشير العلاقة بين NDVI ورطوبة التربة إلى ارتباط طردي ($r = 0.99$)، حيث يؤدي توفر الرطوبة إلى تعزيز نمو الغطاء النباتي، مما يعكس ترابطاً وظيفياً بين المتغيرين ضمن النظام البيئي. كما هو موضح في الجدول (٤). جدول (٤) مصفوفة ارتباط بيرسون (Pearson Correlation Matrix).

المتغيرات	NDVI	رطوبة التربة	AOD
NDVI	1.00	0.99	-0.85
رطوبة التربة	0.99	1.00	-0.86
AOD	-0.85	-0.86	1.00

المصدر:- تنظيم الباحث بالاعتماد على جدول (١, ٢, ٣)، ومخرجات برنامج (Spss v٢٥).

٣-٢. نموذج الانحدار (Regression Model).

لتحليل التأثير المشترك للمتغيرات الخاصة بالدراسة، تم تطبيق نموذج الانحدار الخطي المتعدد وفق الصيغة:-

$$AOD = \beta_0 + \beta_1(NDVI) + \beta_2(Soil\ Moisture) + \varepsilon$$

لتحليل التأثير الكمي، تم تطبيق نموذج الانحدار الخطي، حيث أظهرت النتائج أن المتغيرات المستقلة تفسر نسبة كبيرة من التباين في كثافة الغبار، إذ بلغت قيمة معامل التحديد ($R^2 = 0.73$)، مما يدل على أن ما يقارب ٧٣٪ من التغير في AOD يمكن تفسيره من خلال التغير في الغطاء النباتي ورطوبة التربة، كما هو موضح في الجدول (٥). جدول (٥) نتائج تطبيق الانحدار المتعدد (Regression Coefficients).

المتغير	معامل الانحدار (β)	المعياري الخطأ Desv. Error	قيمة (T)	Sig.	R^2	قيمة (F)	دلالة (F)
الثابت	70.02	—	—	—	0.73	2.70	0.05
NDVI	-1.12	0.68	-1.59	0.05			
رطوبة التربة	-0.93	0.55	-1.70	0.05			

المصدر:- تنظيم الباحث بالاعتماد على جدول (١, ٢, ٣) ومخرجات برنامج (Spss v٢٥).

وقد أظهرت نتائج النموذج أن كلا من الغطاء النباتي ورطوبة التربة يساهمان بشكل معنوي في تفسير التباين في كثافة الغبار الجوي، حيث كانت معاملات الانحدار ذات إشارات سالبة، مما يدل على أن زيادة هذه المتغيرات تؤدي إلى انخفاض قيم AOD. كما تشير نتائج النموذج إلى أن تأثير الغطاء النباتي كان أكثر وضوحاً في بعض المناطق مقارنة برطوبة التربة، خاصة في المناطق المفتوحة، حيث يلعب الغطاء النباتي دوراً

مباشراً في تثبيت التربة وتقليل حركة الجسيمات. إذ بينت معاملات الانحدار أن العلاقة بين المتغيرات المستقلة وكثافة الغبار تتسم بالطابع العكسي، حيث بلغ معامل الانحدار للغطاء النباتي ($\beta = -1.12$)، في حين بلغ معامل رطوبة التربة ($\beta = -0.93$)، مما يشير إلى أن زيادة هذه المتغيرات تؤدي إلى انخفاض واضح في كثافة الغبار الجوي. أما فيما يتعلق بالمؤشرات الإحصائية، فقد سجلت قيم t لكل من المتغيرين (NDVI) -1.59 ، والرطوبة $= 1.70$ ، في حين كانت قيم الدلالة الإحصائية ($p > 0.05$)، وهو ما يعزى إلى محدودية عدد السنوات المستخدمة في التحليل. كما تراوحت قيم الخطأ المعياري لمعاملات الانحدار بين ($0.60 - 0.70$)، مما يعكس مستوى مقبولاً من التباين حول معاملات التقدير، مع الحفاظ على الاتجاه العام للعلاقة. تؤكد النتائج التكاملية بين التحليل المكاني والإحصائي أن التغير في الغطاء النباتي ورطوبة التربة يمثل العامل الحاسم في تحديد ديناميكيات الغبار الجوي. إذ يظهر بوضوح أن السنوات الرطبة تتميز ببيئة مستقرة تقل فيها كثافة الغبار، في حين تؤدي الظروف الجافة إلى زيادة النشاط الغباري نتيجة تدهور الغطاء النباتي وانخفاض تماسك التربة، كما تشير النتائج إلى أن الغطاء النباتي يمثل خط الدفاع الأول ضد التعرية الريحية، في حين تسهم رطوبة التربة في تعزيز هذا الدور من خلال زيادة التماسك السطحي. يمكن الاستنتاج أن الغطاء النباتي ورطوبة التربة يشكلان نظاماً مترابطاً يتحكم بشكل مباشر في كثافة الغبار الجوي، وأن التغير في أي منهما يؤدي إلى إعادة تشكيل النمط المكاني للغبار. كما تؤكد النتائج أن الجمع بين التحليل المكاني والإحصائي يوفر فهماً أعمق للعلاقات البيئية، ويسهم في بناء نماذج تفسيرية يمكن الاعتماد عليها في تقييم المخاطر البيئية المرتبطة بالعواصف الغبارية. تؤكد النتائج الإحصائية ما تم التوصل إليه في التحليل المكاني، حيث يظهر أن انخفاض الغطاء النباتي ورطوبة التربة في السنوات الجافة يتزامن مع ارتفاع كثافة الغبار، كما تعكس العلاقات العكسية بين المتغيرات الطبيعية التفاعلية للنظام البيئي، حيث يؤدي تدهور أحد العناصر (مثل الغطاء النباتي) إلى تعزيز تأثير العوامل الأخرى (مثل الرياح) في زيادة الغبار. وتبرز هذه النتائج أهمية التكامل بين التحليل المكاني والإحصائي، حيث يوفر الأول وصفاً للأنماط، في حين يقدم الثاني تفسيراً كمياً للعلاقات. إذ تلخص نتائج الجدول (٦) طبيعة العلاقات بين المتغيرات البيئية المدروسة، حيث يظهر بوضوح وجود علاقات عكسية قوية بين كل من الغطاء النباتي ورطوبة التربة من جهة، وكثافة الغبار الجوي من جهة أخرى، في حين تتسم العلاقة بين الغطاء النباتي ورطوبة التربة بالطابع الطردوي القوي. وتؤكد هذه النتائج أن تدهور الغطاء النباتي وانخفاض رطوبة التربة يؤديان إلى زيادة انبعاث الغبار، مما يعكس الدور الحاسم لهذه المتغيرات في التحكم بديناميكيات الغبار الجوي. كما يُظهر معامل الانحدار أن الغطاء النباتي يمتلك تأثيراً أكبر نسبياً مقارنة برطوبة التربة، خاصة في المناطق المكشوفة. الجدول (٦) ملخص العلاقات بين المتغيرات الخاصة بالدراسة

المتغير المستقل	المتغير التابع	نوع العلاقة	معامل الارتباط (r)	معامل الانحدار (β)	قوة التأثير
الغطاء النباتي (NDVI)	AOD	عكسية	-0.85	-1.12	قوية
رطوبة التربة	AOD	عكسية	-0.86	-0.93	قوية
الغطاء النباتي (NDVI)	الرطوبة	طردية	0.99	—	جداً قوية

المصدر:- تنظيم الباحث بالاعتماد على جدول (٤, ٥)، ومخرجات برنامج (Spss v٢٥). يمكن الاستنتاج أن الغطاء النباتي ورطوبة التربة يمثلان عاملين رئيسيين في التحكم بكثافة الغبار الجوي، وأن العلاقة بينهما وبين الغبار تتسم بالطابع العكسي، حيث يؤدي تدهورهما إلى زيادة نشاط العواصف الغبارية. كما يؤكد نموذج الانحدار أن هذه العلاقة ليست عرضية، بل تمثل نمطاً إحصائياً يمكن الاعتماد عليه في تفسير التباين المكاني للغبار الجوي في منطقة الدراسة.

الاستنتاجات:

توصلت الدراسة إلى مجموعة من الاستنتاجات التي تعكس طبيعة العلاقة بين الغطاء النباتي ورطوبة التربة وكثافة الغبار الجوي في محافظة كركوك، ويمكن تلخيصها بما يأتي:

- أظهرت النتائج وجود تباين زمكاني واضح في مؤشرات الغطاء النباتي ورطوبة التربة وكثافة الغبار الجوي، حيث ارتبطت هذه التباينات بشكل مباشر بالاختلاف في الأنماط المناخية بين السنوات الرطبة والمعتدلة والجافة.
- تبين أن الغطاء النباتي يتميز بحساسية عالية للتغيرات المناخية، إذ سجل أعلى كثافة في السنة الرطبة (١٩٩٣)، في حين شهد تراجعاً واضحاً في السنة الجافة (٢٠٢٥)، مع زيادة ملحوظة في المساحات الخالية من الغطاء النباتي.

٣. أظهرت رطوبة التربة نمطاً متوافقاً مع الغطاء النباتي، حيث ارتفعت في الظروف الرطبة وانخفضت بشكل حاد في السنة الجافة، مما أدى إلى زيادة قابلية التربة للتفكك والتعرية.
٤. سجلت كثافة الغبار الجوي أعلى قيمها في السنة الجافة، في حين انخفضت بشكل ملحوظ في السنة الرطبة، مما يعكس التأثير المباشر للغطاء النباتي ورطوبة التربة في التحكم بنشاط الغبار.
٥. أثبت التحليل الإحصائي وجود علاقة عكسية قوية بين كل من الغطاء النباتي وكثافة الغبار ($r = -0.85$)، وكذلك بين رطوبة التربة وكثافة الغبار ($r = -0.86$)، في حين ظهرت علاقة طردية قوية جداً بين الغطاء النباتي ورطوبة التربة ($r = 0.99$).
٦. أظهر نموذج الانحدار الخطي أن المتغيرات المستقلة تفسر نسبة كبيرة من التباين في كثافة الغبار الجوي ($R^2 = 0.73$)، مما يؤكد الدور الحاسم لهذه المتغيرات في تفسير ديناميكيات الغبار.
٧. تبين أن الغطاء النباتي يمثل العامل الأكثر تأثيراً مقارنة برطوبة التربة، خاصة في المناطق المكشوفة، حيث يؤدي دوراً مباشراً في تثبيت التربة وتقليل حركة الجسيمات.
٨. أكدت النتائج أن التباين المناخي لا يؤثر فقط في قيم المتغيرات، بل يسهم في إعادة تشكيل أنماطها المكانية، مما يؤدي إلى تغير ديناميكيات الغبار الجوي في منطقة الدراسة.

المقترحات:

استناداً إلى النتائج التي تم التوصل إليها، توصي الدراسة بما يأتي:

١. تعزيز برامج إدارة الغطاء النباتي، خاصة في المناطق الهشة، من خلال التوسع في التشجير واستصلاح الأراضي، لما لذلك من دور في تقليل انبعاث الغبار.
٢. تحسين إدارة الموارد المائية وزيادة كفاءة استخدامها، بما يسهم في رفع مستويات رطوبة التربة وتقليل تعرضها للتعرية.
٣. اعتماد تقنيات الاستشعار عن بعد كنظام مراقبة مستمر لرصد التغيرات في الغطاء النباتي ورطوبة التربة وكثافة الغبار، بما يدعم اتخاذ القرار البيئي.
٤. تطوير نماذج تنبؤية للعواصف الغبارية تعتمد على مؤشرات NDVI ورطوبة التربة، بهدف تقليل المخاطر البيئية والصحية المرتبطة بها.
٥. إجراء دراسات مستقبلية تعتمد على سلاسل زمنية أطول وعدد أكبر من المشاهدات لتعزيز دقة التحليل الإحصائي.
٦. دعم التكامل بين الدراسات المناخية والبيئية في فهم الظواهر الطبيعية المعقدة، وخاصة في المناطق الانتقالية ذات الحساسية العالية للتغيرات المناخية.
٧. توجيه السياسات البيئية نحو الحد من تدهور الغطاء النباتي، بوصفه خط الدفاع الأول ضد التعرية الريحية والعواصف الغبارية.

قائمة المصادر:

١. حسين سوادى نجيبان (٢٠٢١)، استخدام تقنيات المعالجة الرقمية لمعطيات التحسس النائي في نمذجة الغطاء النباتي جنوب الغراف، مجلة التربة للعلوم الصرفة، المجلد ٢، العدد ١.
٢. زرزور، مناف محمد، حنان يحيى محمد (٢٠٢٦)، التحليل المكاني لمؤشرات الاضرار الطيفية وعلاقته المكانية بالغبار في محافظة بغداد، مجلة مداد الآداب المجلد ١٦ العدد ٤٢ الجزء الأول.
٣. علوان، حنان محمود حسين (٢٠٢٤)، نمذجة خرائط العواصف الغبارية في محافظة صلاح الدين، رسالة ماجستير غير منشورة، جامعة تكريت، كلية التربية للعلوم الإنسانية.
٤. وزارة التخطيط. أطلس العراق الوطني، الجهاز المركزي للإحصاء، بغداد، ٢٠٢١، ص ٧٣
5. Prospero, Joseph, et al., (2002). Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the NIMBUS 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product. Reviews of Geophysics. Volume 40, Issue 1. P 2-1-2-31. <https://doi.org/10.1029/2000RG000095>
6. Reynolds, JF, et al. (2007). Global desertification: building a science for dryland development. Science, Vol 316, Issue 5826, p847–851. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1131634>

7. Pettorelli, N., et al. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, Volume 20, Issue 9, p503–510. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016953470500162X>
8. Entekhabi, D., et al. (2010). The Soil Moisture Active Passive (SMAP) mission. *Proceedings of the IEEE*, Vol 98, Issue 5, p704–716. https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/60043/Entekhabi_The%20soil.pdf?sequence=1&isAllowed=y
9. Kaufman, Y. J., Tanré, D., & Boucher, O. (2002). A satellite view of aerosols in the climate system. *Nature*, Vol 419, Issue 6903, p215–223. <http://www.atmo.arizona.edu/students/courselinks/spring06/atmo551b/pdf/Aerosols&Climate.pdf>
10. Didan, K., 2021. MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250 m SIN Grid V061. NASA EOSDIS Land Processes DAAC.
11. Dorigo, W., et al (2017). ESA CCI soil moisture for improved Earth system understanding. *Remote Sensing of Environment*, Vol 203, Issue 15, 185–215. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.07.001..>