العراقية
المجلات الاكاديمية العلمية
IRAQI Academic Scientific Journals
Al-Itqan Journal of Humanities
available online at
https://iasj.rdd.edu.iq/journals/journal/view/575
ISSN: 3105-1073 (OnLine)
المجلة معتمدة بالترقيات العلمية حسب كتاب وزارة التعليم العراقية (46404-1410) في 2026/4/27

التنبؤ الزمكاني بموجات الجفاف باستخدام النمذجة الذكية المعتمدة على بيانات الاستشعار عن بعد في محافظة صلاح الدين

أ.م.د. محمد عطية صالح
جامعة تكريت/ كلية التربية للعلوم الإنسانية/ قسم الجغرافية

Spatiotemporal Prediction of Drought Waves Using Intelligent Modeling Based on Remote Sensing Data in Salah Al-Din Governorate

Assoc. Prof. Dr. Mohammed Atiyah Saleh
University of Tikrit / College of Education for Humanities / Department of Geography

المستخلص

يهدف هذا البحث إلى تحليل التباين الزمكاني لموجات الجفاف في محافظة صلاح الدين والتنبؤ باتجاهاتها المستقبلية اعتماداً على النمذجة الذكية وبيانات الاستشعار عن بعد. اعتمدت الدراسة على تحليل السلسلة الزمنية لمؤشر الهطول القياسي (SPI) للمدة (١٩٩٥–٢٠٢٥)، إلى جانب استخدام بيانات الأقمار الصناعية لاستخراج مؤشرات الجفاف البيئية المتمثلة بمؤشر الغطاء النباتي (NDVI) ودرجة حرارة سطح الأرض (LST)، بهدف تفسير ديناميكية الجفاف وعلاقته بالمتغيرات المناخية والبيئية في منطقة الدراسة. وقد استندت البيانات الفضائية إلى منتجات منصة NASA Earthdata، ولاسيما MOD13Q1 لاستخراج مؤشر الغطاء النباتي وMOD11A2 لاشتقاق درجة حرارة سطح الأرض، إضافة إلى البيانات المناخية طويلة الأمد للأمطار. تم توظيف مجموعة من نماذج التعلم الآلي شملت Random Forest (RF) و XGBoostلتحليل أهمية المتغيرات المؤثرة في الجفاف وتصنيفه مكانياً، فضلاً عن استخدام نموذج Long Short–Term Memory (LSTM) لتحليل السلاسل الزمنية والتنبؤ بالقيم المستقبلية لمؤشر الجفاف. وأظهرت النتائج وجود تباين مكاني واضح في شدة الجفاف داخل المحافظة، مع تركز ملحوظ في الأجزاء الوسطى والجنوبية خلال بعض السنوات الجافة. كما أظهرت نتائج التنبؤ اتجاهاً نحو تزايد تكرار الجفاف المعتدل مستقبلاً، إذ تشير القيم المتوقعة لمؤشر SPI إلى تحول الحالة المناخية من رطوبة معتدلة خلال (٢٠٢٦–٢٠٢٩) إلى جفاف معتدل يمتد حتى عام ٢٠٥٠ بمتوسط متوقع بلغ (−0.3076).

Abstract

This study aims to analyze the spatiotemporal variability of drought waves in Salah al-Din Governorate and to predict their future trends using intelligent modeling and remote sensing data. The research analyzed the temporal series of the Standardized Precipitation Index (SPI) for the period (1995–2025), in addition to satellite-derived environmental indicators including the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Land Surface Temperature (LST), in order to interpret drought dynamics and their relationship with climatic and environmental variables in the study area. Satellite data were obtained from the NASA Earthdata platform, particularly the MOD13Q1 product for extracting NDVI and the MOD11A2 product for deriving land surface temperature, alongside long-term rainfall records.Several machine learning models were employed, including Random Forest (RF) and XGBoost, to analyze the importance of variables influencing drought and to classify its spatial patterns. In addition, the Long Short-Term Memory (LSTM) model was applied to analyze temporal series and predict future drought conditions. The results revealed a clear spatial variation in drought intensity within the governorate, with higher concentrations in the central and southern parts during certain dry years. Forecasting results indicate a future tendency toward increased occurrence of moderate drought conditions,

where SPI values are expected to shift from moderately wet conditions during (2026–2029) to moderate drought extending until 2050, with an average predicted value of (-0.3076).

المقدمة:

يُعدّ الجفاف من أخطر الظواهر المناخية المركّبة التي تتسم بالتدرّج الزمني والامتداد المكاني الواسع، لما يترتب عليه من آثار بيئية واقتصادية واجتماعية مباشرة، لا سيما في البيئات الجافة وشبه الجافة. ولا يقتصر خطر الجفاف على انخفاض كميات الأمطار فحسب، بل يتجلى في تفاعلات معقّدة تشمل ارتفاع درجات الحرارة، وتدهور الغطاء النباتي، وتراجع الموارد المائية السطحية والجوفية، الأمر الذي يجعله ظاهرة ديناميكية يصعب توصيفها أو التنبؤ بها بالاعتماد على الأساليب التقليدية وحدها.وفي هذا السياق، تمثل مناطق العراق، ولا سيما محافظة صلاح الدين، نموذجاً واضحاً لتنامي مخاطر الجفاف خلال العقود الأخيرة، نتيجة تذبذب الأنماط المطرية، وتزايد موجات الحرارة، فضلاً عن الضغوط البشرية المتزايدة على الموارد المائية والأراضي الزراعية. وقد انعكس ذلك في تكرار موجات الجفاف وتباين شدّتها مكانياً وزمانياً، بما أسهم في تفاقم المشكلات الزراعية والبيئية، وازدياد الهشاشة البيئية في أجزاء واسعة من المحافظة.وعلى الرغم من تعدد الدراسات التي تناولت الجفاف في العراق، إلا أن معظمها انصبّ على التحليل الوصفي أو الإحصائي التقليدي، مع تركيز محدود على البعد الزمكاني المتكامل، وضعف في توظيف تقنيات التنبؤ المستقبلي المعتمدة على النمذجة الذكية. كما أن الاعتماد على البيانات المناخية الأرضية وحدها يظل غير كافٍ لرصد ديناميكية الجفاف بدقة مكانية عالية، لاسيما في المناطق التي تعاني من تباعد المحطات المناخية أو عدم انتظام سلاسلها الزمنية.من هنا، تبرز أهمية الاستفادة من بيانات الاستشعار عن بعد طويلة الأمد، لما توفره من تغطية مكانية شاملة وسلاسل زمنية متواصلة، تتيح تتبع تطور مؤشرات الجفاف البيئية والمناخية، مثل مؤشرات الغطاء النباتي ودرجة حرارة سطح الأرض، وربطها بالتغيرات المطرية. كما يتيح توظيف النمذجة الذكية، ولا سيما نماذج التعلم الآلي والتعلم العميق، فهماً أعمق للعلاقات غير الخطية المعقدة بين متغيرات الجفاف، وتعزيز القدرة على التنبؤ الزمكاني بموجاته المستقبلية بدرجة أعلى من الدقة والموثوقية وانطلاقاً من ذلك، يسعى هذا البحث إلى توظيف النمذجة الذكية المعتمدة على بيانات الاستشعار عن بعد، في تحليل وتفسير والتنبؤ الزمكاني بموجات الجفاف في محافظة صلاح الدين خلال المدة (1995–٢٠٢٥)، بما يسهم في بناء قاعدة علمية داعمة لجهود التخطيط الزراعي وإدارة الموارد المائية، ويعزز من إمكانات الإنذار المبكر والتكيف مع مخاطر الجفاف على المديين المتوسط والبعيد.

اولاً. مشكلة البحث:

تتمثل مشكلة البحث في محدودية الفهم الزمكاني والتنبؤي لموجات الجفاف في محافظة صلاح الدين، نتيجة الاعتماد على أساليب تحليل تقليدية وضعف توظيف بيانات الاستشعار عن بعد والنمذجة الذكية، مما يحدّ من القدرة على تحديد أنماط الجفاف واتجاهاته المستقبلية بدقة مكانية وزمنية عالية. وانطلاقاً من هذه الإشكالية الرئيسة، تتمحور مشكلة البحث حول التساؤلات الآتية:

١. ما الخصائص الزمكانية لموجات الجفاف في محافظة صلاح الدين خلال المدة (1995–٢٠٢٥)، من حيث التكرار والشدة والامتداد المكاني؟

٢. إلى أي مدى تسهم بيانات الاستشعار عن بعد والمؤشرات المناخية والبيئية المستخرجة منها في تحسين فهم ديناميكية الجفاف وتباينات المكانية والزمانية داخل المحافظة؟

٣. ما كفاءة النماذج الذكية المعتمدة على التعلم الآلي في التنبؤ المكاني بشدة موجات الجفاف وتصنيفها مقارنة بالأساليب التقليدية؟

٤. ما إمكانات نماذج التعلم العميق في التنبؤ الزمني المستقبلي بموجات الجفاف في محافظة صلاح الدين، وما اتجاهات تطورها المحتملة على المديين المتوسط والبعيد؟

ثانياً. فرضية البحث:

١. تتباين موجات الجفاف في محافظة صلاح الدين تبايناً مكانياً وزمانياً واضحاً خلال المدة (1995–٢٠٢٥)، من حيث التكرار والشدة والامتداد المكاني، ولا تتوزع بصورة عشوائية داخل حدود المحافظة.

٢. يسهم دمج بيانات الاستشعار عن بعد مع المؤشرات المناخية والبيئية المستخرجة منها في تحسين تفسير ديناميكية الجفاف والكشف عن تبايناته الزمكانية بدرجة أعلى من الاعتماد على البيانات المناخية التقليدية وحدها.

٣. تتمتع نماذج التعلم الآلي بكفاءة تنبؤية مكانية أعلى في تصنيف شدة موجات الجفاف مقارنة بالأساليب الإحصائية التقليدية، نتيجة قدرتها على تمثيل العلاقات غير الخطية بين متغيرات الجفاف.

٤. تمتلك نماذج التعلم العميق قدرة فاعلة على التنبؤ الزمني المستقبلي بموجات الجفاف واتجاهاتها المحتملة في محافظة صلاح الدين على المديين المتوسط والبعيد، مع انخفاض ملحوظ في قيم الخطأ التنبؤي مقارنة بالنماذج الخطية التقليدية.

ثالثاً. اهداف البحث:

١. يهدف هذا البحث إلى تحليل والتنبؤ الزمكاني بموجات الجفاف في محافظة صلاح الدين خلال المدة (1995–٢٠٢٥)، بالاعتماد على بيانات الاستشعار عن بعد وتوظيف النمذجة الذكية، من أجل تحديد أنماط الجفاف واتجاهاته المستقبلية بدقة مكانية وزمنية عالية.

٢. تحليل الخصائص الزمكانية لموجات الجفاف في محافظة صلاح الدين من حيث التكرار والشدة والامتداد المكاني خلال مدة الدراسة.

٣. استخراج مؤشرات الجفاف المناخية والبيئية من بيانات الاستشعار عن بعد، وتحليل دورها في تفسير ديناميكية الجفاف وتباينانه المكانية والزمانية.

٤. تقييم كفاءة نماذج التعلم الآلي في التنبؤ المكاني بشدة موجات الجفاف وتصنيفها داخل المحافظة.

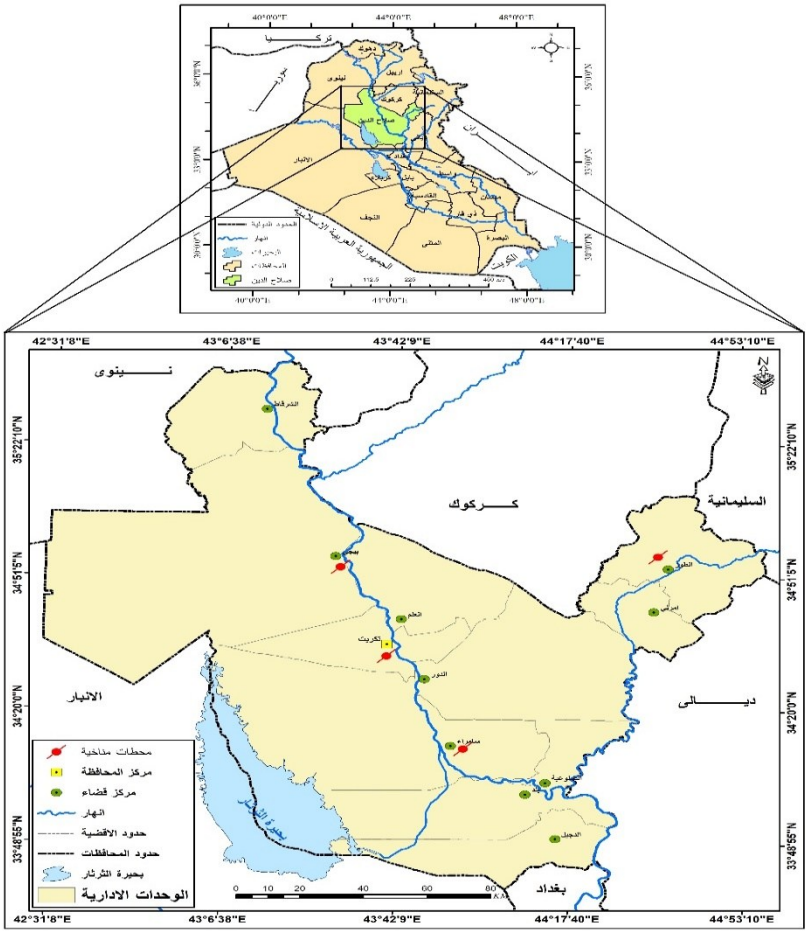
٥. بناء نموذج تنبؤ زمني مستقبلي لموجات الجفاف بالاعتماد على نماذج التعلم العميق وتحليل اتجاهاتها المحتملة على المديين المتوسط والبعيد.

٦. تمثيل نتائج التنبؤ في خرائط زمكانية توضح مناطق التركّز المحتملة لموجات الجفاف، بما يسهم في دعم التخطيط الزراعي وإدارة الموارد المائية.

رابعاً. موقع منطقة الدراسة:

تقع محافظة صلاح الدين في الجزء الشمالي من وسط العراق، وتمتد فلكياً بين دائرتي عرض (٤٥ ′ ٣٣°) و(١٥ ′ ٣٥°) شمالاً، وخطي طول (٣٠ ′ ٤٢°) و(٤٥ ′ ٤٤°) شرقاً، وهو موقع يجعلها ضمن النطاق الانتقالي بين مناخي المنطقة الجبلية في الشمال والمناخ الصحراوي في الغرب، ما يضفي تنوعاً على خصائصها البيئية. جغرافيًا، تحدها محافظات نينوى من الشمال، كركوك الشمال الشرقي، السليمانية من الشرق، ديالى الجنوب الشرقي، بغداد من الجنوب، والأنبار من الجهة الغربية، وهو ما يمنحها موقعاً محورياً ضمن شبكة الاتصال الإقليمي في البلاد.[١] الخريطة

(١)خريطة (١) موقع منطقة الدراسة

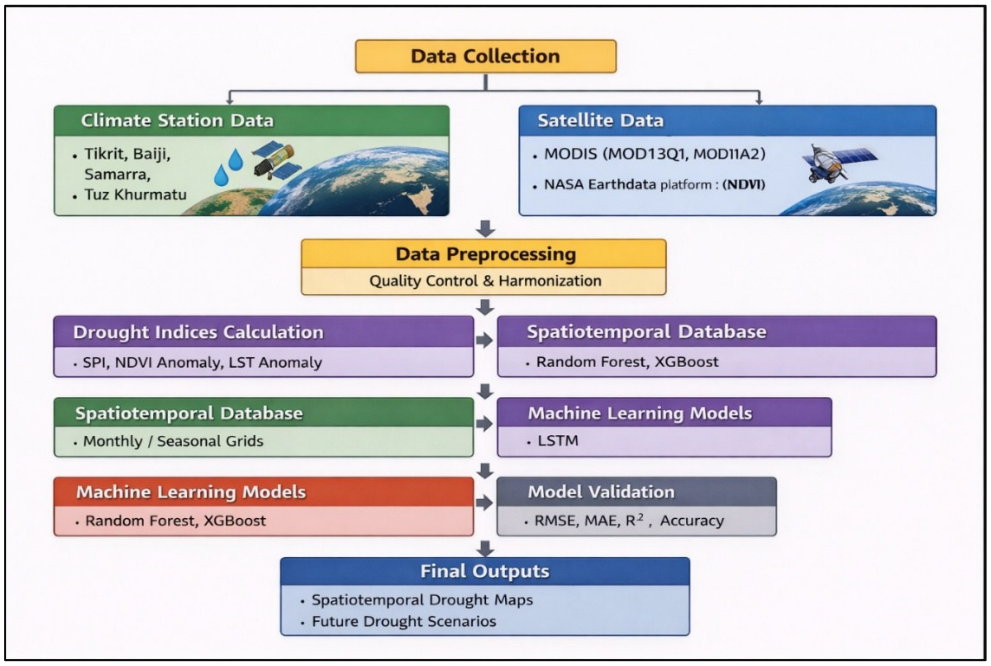


المصدر: اعتماداً على: جمهورية العراق، الهيئة العامة للمساحة، خريطة العراق الإدارية بمقياس ١/٥٠٠٠٠٠، ومخرجات برنامج نظم المعلومات الجغرافية Arc GIS (10.8).

خامساً. آلية العمل والمنهجية العامة للبحث:

يعتمد هذا البحث على منهجية علمية متكاملة تهدف إلى تحليل والتنبؤ الزمكاني بموجات الجفاف من خلال الدمج بين البيانات المناخية الأرضية وبيانات الاستشعار عن بعد، وتوظيف تقنيات النمذجة الذكية الحديثة. إذ تبدأ آلية العمل بجمع البيانات المناخية الشهرية لمحطات الرصد الأرضية، متمثلة بمحطات تكريت، بيجي، سامراء، وطوزخورماتو، إلى جانب المرئيات الفضائية متعددة المصادر، التي توفر تمثيلاً مكانياً وزمانياً مستمراً للتغيرات البيئية المرتبطة بالجفاف.تلي ذلك مرحلة معالجة البيانات، التي تشمل فحص الجودة والتجانس الزمني والمكاني، تمهيداً لاستخراج مؤشرات الجفاف المناخية والبيئية، مثل مؤشر الهطول القياسي ومؤشرات الغطاء النباتي ودرجة حرارة سطح الأرض. وبعدها تُدمج هذه المؤشرات ضمن قاعدة بيانات زمكانية موحدة، تتيح إجراء التحليل المكاني للكشف عن أنماط التركز والاتجاهات الزمنية لموجات الجفاف داخل منطقة الدراسة.وفي المراحل اللاحقة، يتم توظيف نماذج التعلم الآلي في التنبؤ المكاني بشدة الجفاف وتصنيف مناطقه، فضلاً عن استخدام نماذج التعلم العميق في التنبؤ الزمني المستقبلي بموجات الجفاف واتجاهاتها المحتملة، مع تقييم كفاءة النماذج باستخدام مؤشرات إحصائية مناسبة. وتُختتم آلية العمل بإنتاج خرائط زمكانية وسيناريوهات مستقبلية للجفاف تسهم في دعم التخطيط الزراعي وإدارة الموارد المائية، وكما في الشكل (١).

شكل (١) المخطط التفصيلي لألية العمل في البحث



المصدر: اعتماداً على خطوات البحث المنهجية باستخدام الذكاء الاصطناعي.

سادساً. معالجة بيانات المحطات المناخية

تمثلت بيانات المحطات المناخية بسجلات الأمطار ودرجات الحرارة الشهرية العائدة لمحطات تكريت، بيجي، سامراء، وطوزخورماتو. وقد جرى في هذه المرحلة فحص السلاسل الزمنية للكشف عن القيم الناقصة أو غير المنطقية، والتأكد من استمرارية البيانات ضمن المدة الزمنية المعتمدة في البحث. كما تم توحيد الوحدات الزمنية للبيانات بما ينسجم مع متطلبات حساب مؤشرات الجفاف المناخية، وبخاصة مؤشر الهطول القياسي (SPI).ويهدف هذا الإجراء إلى تقليل تأثير الأخطاء الرصدية والتباينات غير المناخية في السلاسل الزمنية، وضمان أن التغيرات المرصودة تعكس السلوك المناخي الحقيقي، وهو ما تؤكد عليه الأدبيات المناخية التي تشدد على ضرورة معالجة بيانات المحطات قبل استخدامها في تحليل الجفاف أو التنبؤ به[٢]. وكما في الشكل (٢).

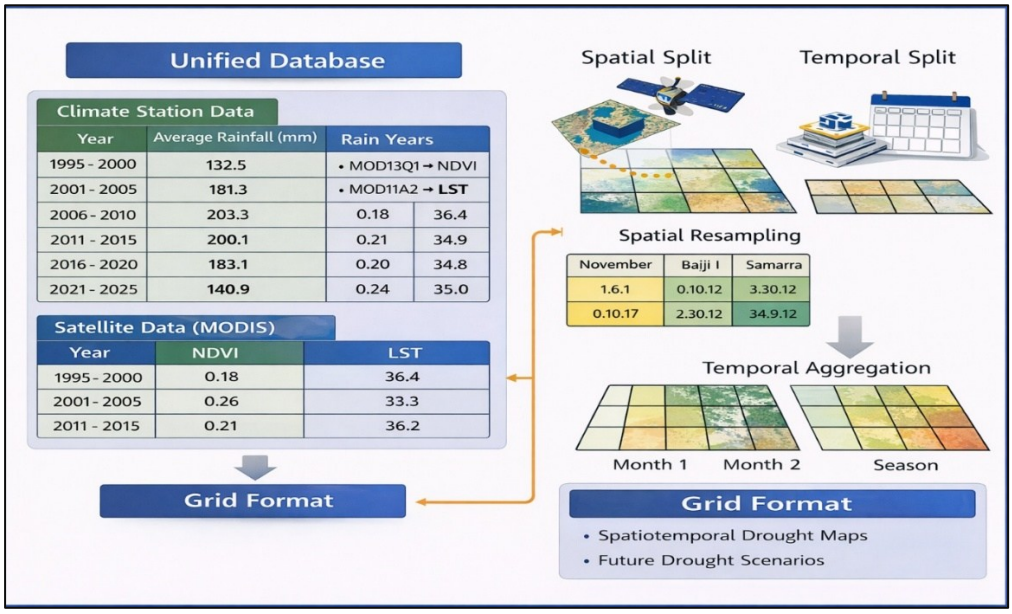
سابعاً. معالجة المرئيات الفضائية

شملت معالجة المرئيات الفضائية بيانات الأقمار الصناعية، التي استُخدمت لاستخراج مؤشرات الغطاء النباتي ودرجة حرارة سطح الأرض. وقد تضمنت هذه المرحلة إجراءات التصحيح الإشعاعي والطيفي، واختيار المرئيات الخالية من الغيوم قدر الإمكان، فضلاً عن توحيد الدقة المكانية والزمانية للمرئيات بما ينسجم مع متطلبات التحليل الزمكاني.وتُعد هذه الإجراءات ضرورية لضمان أن التغيرات المستخرجة من المرئيات الفضائية ناتجة عن تغيرات بيئية فعلية، وليست انعكاساً لاختلاف ظروف التصوير أو خصائص المستشعر. وقد جرى التأكيد في العديد من الدراسات على أن المعالجة المسبقة للمرئيات الفضائية تمثل شرطاً أساسياً لاستخدامها في دراسات الجفاف والتغير البيئي[٣]. وكما في الشكل (٢).

ثامناً. توحيد البيانات وبناء قاعدة البيانات الزمكانية

بعد إتمام معالجة البيانات المناخية والفضائية كلٌّ على حدة، تم توحيدها ضمن قاعدة بيانات زمكانية واحدة، من خلال تحويلها إلى صيغ شبكية (Grid) ذات مرجعية مكانية موحدة، وربطها زمنياً على أساس شهري أو موسمي. وقد أتاح هذا الإجراء دمج البيانات متعددة المصادر في إطار تحليلي واحد، يمكّن من إجراء التحليل المكاني والزماني للجفاف، وتغذية نماذج التعلم الآلي والتعلم العميق ببيانات متجانسة ومتوافقة. وكما في الشكل (٢).ويُعد هذا التكامل بين البيانات المناخية الأرضية وبيانات الاستشعار عن بعد خطوة أساسية في الدراسات الحديثة، لما يوفره من تمثيل شامل لديناميكية الجفاف، ويعزز من كفاءة النماذج التنبؤية ودقة مخرجاتها.[٤]

شكل (٢) الية معالجة البيانات المكانية والوصفية ضمن منطقة الدراسة



المصدر: اعتماداً على خطوات البحث المنهجية باستخدام الذكاء الاصطناعي.

تاسعاً. مؤشرات الجفاف المعتمدة:

يُعدّ الجفاف من الظواهر الطبيعية المعقّدة التي يصعب توصيفها اعتماداً على متغير واحد أو فترة زمنية محددة، نظراً لتداخله مع عناصر مناخية وبيئية متعددة، واختلاف مظاهره من حيث الشدة والمدة والامتداد المكاني. ومن هنا برزت الحاجة إلى تطوير مؤشرات كمية قادرة على قياس الجفاف وتشخيصه بصورة موضوعية، من خلال تحويل البيانات المناخية والبيئية الخام إلى قيم معيارية تسهّل المقارنة المكانية والزمانية، وتساعد في تتبع تطور الجفاف ومراحله المختلفة[٥].وتُعرف مؤشرات الجفاف بأنها أدوات تحليلية إحصائية أو بيئية تهدف إلى قياس درجة الانحراف عن الظروف المناخية أو البيئية الطبيعية، اعتماداً على متغير واحد أو مجموعة من المتغيرات، مثل الأمطار ودرجة الحرارة ورطوبة التربة والغطاء النباتي. وتتميز هذه المؤشرات بقدرتها على تمثيل الجفاف على مقاييس زمنية متعددة، تبدأ من الفترات القصيرة ذات التأثير الزراعي المباشر، وصولاً إلى الفترات الطويلة التي تنعكس آثارها على الموارد المائية والأنظمة البيئية[٦].كما تختلف مؤشرات الجفاف في طبيعتها ووظائفها تبعاً للبعد الذي تركز عليه، إذ تُستخدم بعض المؤشرات لتشخيص الجفاف المناخي المرتبط بنقص الهطول المطري، في حين تُعنى مؤشرات أخرى بتتبع استجابة الغطاء النباتي للإجهاد المائي، أو برصد التغيرات الحرارية السطحية المصاحبة لموجات الجفاف. ويُعد هذا التنوع في المؤشرات أمراً ضرورياً لفهم الجفاف بوصفه ظاهرة متعددة الأبعاد، وليس مجرد حالة نقص في الأمطار[٧].وبناءً على ما تقدم، سيتم في الفقرات اللاحقة تناول أنواع الجفاف الرئيسة، وبيان خصائص كل نوع، ثم استعراض المؤشرات العلمية المناسبة لتشخيصه وقياس شدّته، كما في الشكل (٣). تمهيداً لتطبيقها على منطقة الدراسة وتحليل تبايناتها المكانية والزمانية.**شكل (٣) أنواع الجفاف المستخدمة في الدراسة**

المصدر: اعتماداً على خطوات البحث المنهجية باستخدام الذكاء الاصطناعي.

٩-1. الجفاف المناخي:

يُعدّ الجفاف المناخي من أبكر مظاهر الجفاف وأكثرها ارتباطاً بالعناصر المناخية، إذ ينتج بصورة رئيسة عن انخفاض كميات الأمطار عن معدلاتها الطبيعية خلال فترة زمنية معينة، سواء أكانت قصيرة أم طويلة الأمد. ويُمثّل هذا النوع من الجفاف المرحلة الأولى التي تمهّد لظهور بقية أشكال الجفاف، كالجفاف النباتي والهيدرولوجي، في حال استمرار العجز المطري لفترات متعاقبة[٨].وتكمن أهمية دراسة الجفاف المناخي في كونه يعكس التذبذب الزمني للهطول المطري، ويتيح تشخيص التغيرات المناخية طويلة الأمد، فضلاً عن دوره في دعم جهود التنبؤ المبكر بالمخاطر البيئية والاقتصادية المرتبطة بندرة المياه. ونظراً لصعوبة الاعتماد على القيم المطلقة للأمطار في توصيف الجفاف، فقد جرى تطوير مؤشرات معيارية قادرة على تمثيل الانحراف عن الحالة الطبيعية بصورة كمية قابلة للمقارنة.صمم هذا المُؤشر من قبل (McKee Teal) حيث يستخدم دليل المطر القياسي(SPI: Standardized Precipitation Index) لتقييم العجز في التساقط وقد تم تطوير مؤشر المطر القياسي SPI من اجل فهم تأثير النقص في الأمطار على رطوبة التربة ليناسب عدَّة مقاييس زمنية لتحليل الأمطار ودراسة تأثير الجفاف على الأنواع المختلفة لمصادر المياه ولهذا يتم احتساب قيم SPI لفترات تبلغ 3، 6، 12، 24 شهراً حسب الغاية من التحليل ((٩)). جرى احتساب المتوسط الحسابي للأمطار السنوية للمحطات الأربع لكل سنة، بهدف تمثيل السلوك المطري العام لمحافظة صلاح الدين وتقليل التباين الموضعي بين المحطات. وكما في الجدول (١).يبين الجدول (١) والشكل (٤) تصنيف السنوات المناخية في منطقة الدراسة اعتماداً على قيم مؤشر الهطول القياسي (SPI) خلال المدة (١٩٩٥–٢٠٢٥) وجود تباين واضح في طبيعة الظروف المناخية بين سنوات رطبة وأخرى جافة، إلا أن الغالبية العظمى من السنوات تركزت ضمن فئتي معتدل الرطوبة ومعتدل الجفاف. فقد سجلت عدة سنوات قيماً موجبة للمؤشر، مما يعكس تحسناً نسبياً في كميات الهطول المطري، مثل السنوات (١٩٩٥، ١٩٩٦، ١٩٩٧، ٢٠٠٢، ٢٠٠٣، ٢٠٠٤، ٢٠١٣، ٢٠١٥، ٢٠١٦، ٢٠٢٣، ٢٠٢٤، ٢٠٢٥)، والتي صُنفت ضمن فئة معتدل الرطوبة، وهو ما يدل على توفر ظروف مطرية مناسبة نسبياً أسهمت في تحسين الحالة الرطوبية للمنطقة.في المقابل، برزت مجموعة من السنوات التي اتسمت بقيم سالبة للمؤشر، ما يشير إلى تعرض المنطقة لحالات من الجفاف المعتدل، كما في السنوات (١٩٩٨، ١٩٩٩، ٢٠٠٠، ٢٠٠١، ٢٠٠٥، ٢٠٠٧، ٢٠٠٨، ٢٠٠٩، ٢٠١٠، ٢٠١١، ٢٠١٢، ٢٠١٤، ٢٠١٧، ٢٠١٩، ٢٠٢٠، ٢٠٢٢)، الأمر الذي يعكس تذبذب كميات الأمطار وعدم استقرارها عبر الزمن. كما يظهر الجدول حدوث حالات متطرفة محدودة، إذ سجلت سنة ٢٠١٨ قيمة مرتفعة جداً للمؤشر بلغت (٣.٠٣) وصُنفت ضمن شديد الرطوبة جداً، ما يشير إلى وفرة استثنائية في الهطول المطري خلال تلك ا...لسنة، في حين سجلت سنة ٢٠٢١ قيمة منخفضة بلغت (–١.٦٨) وصُنفت ضمن شديد الجفاف، مما يدل على تعرض المنطقة لظروف جفاف قاسية في تلك السنة.وعند النظر إلى المعدل العام للمؤشر خلال مدة الدراسة، فقد بلغ نحو (–٠.٠٤)، وهو يقع ضمن فئة معتدل الجفاف، الأمر الذي يشير إلى ميل المناخ في منطقة الدراسة نحو حالة جفاف طفيفة على المدى الطويل، مع استمرار التذبذب السنوي في كميات الأمطار بين سنوات رطبة وأخرى جافة، وهو ما يعكس الطبيعة المناخية غير المستقرة التي تتسم بها المناطق شبه الجافة.

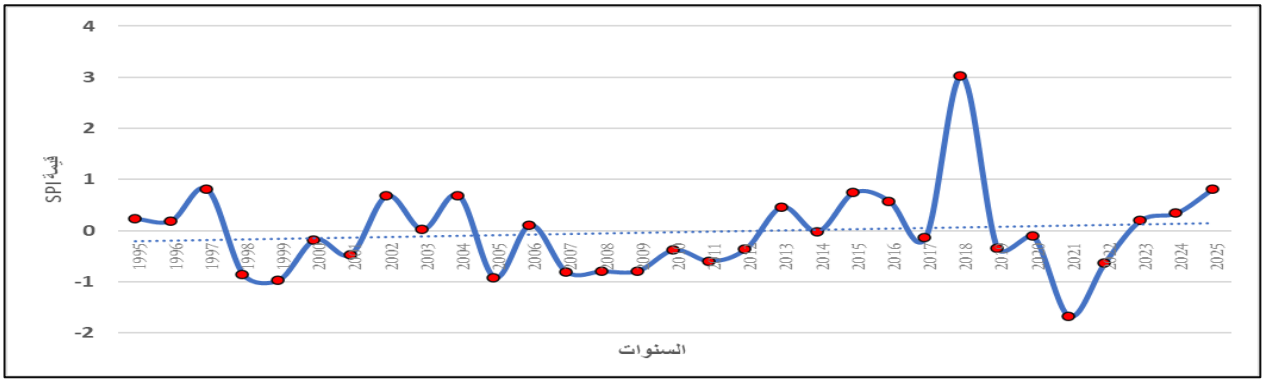
جدول (١) قيم مؤشر SPI12 لمعدلات المحطات (تكريت، بيجي، سامراء، الطوز) للمدة ١٩٩٥–٢٠٢٥

السنة	كمية الامطار/ملم	قيمة SPI	تصنيف الحالة المناخية	السنة	كمية الامطار/ملم	قيمة SPI	تصنيف الحالة المناخية
1995	237.4	0.23	معتدل الرطوبة	2011	184.0	−0.6	معتدل الجفاف

1996	244.6	0.19	معتدل الرطوبة	2012	176.1	-0.36	معتدل الجفاف
1997	283.8	0.81	معتدل الرطوبة	2013	227.3	0.46	معتدل الرطوبة
1998	152.6	-0.86	معتدل الجفاف	2014	225.4	-0.02	معتدل الجفاف
1999	150.6	-0.97	معتدل الجفاف	2015	238.0	0.74	معتدل الرطوبة
2000	191.3	-0.18	معتدل الجفاف	2016	236.1	0.57	معتدل الرطوبة
2001	175.7	-0.47	معتدل الجفاف	2017	224.5	-0.14	معتدل الجفاف
2002	272.8	0.68	معتدل الرطوبة	2018	454.3	3.03	شديد الرطوبة جداً
2003	230.0	0.02	معتدل الرطوبة	2019	165.4	-0.35	معتدل الجفاف
2004	292.8	0.69	معتدل الرطوبة	2020	190.1	-0.11	معتدل الجفاف
2005	157.2	-0.92	معتدل الجفاف	2021	111.8	-1.68	شديد الجفاف
2006	203.0	0.11	معتدل الرطوبة	2022	172.1	-0.63	معتدل الجفاف
2007	146.6	-0.81	معتدل الجفاف	2023	215.5	0.2	معتدل الرطوبة
2008	151.6	-0.8	معتدل الجفاف	2024	227.0	0.34	معتدل الرطوبة
2009	171.7	-0.79	معتدل الجفاف	2025	249.0	0.81	معتدل الرطوبة
2010	195.9	-0.38	معتدل الجفاف	المعدل	211.4	-0.04	معتدل الجفاف

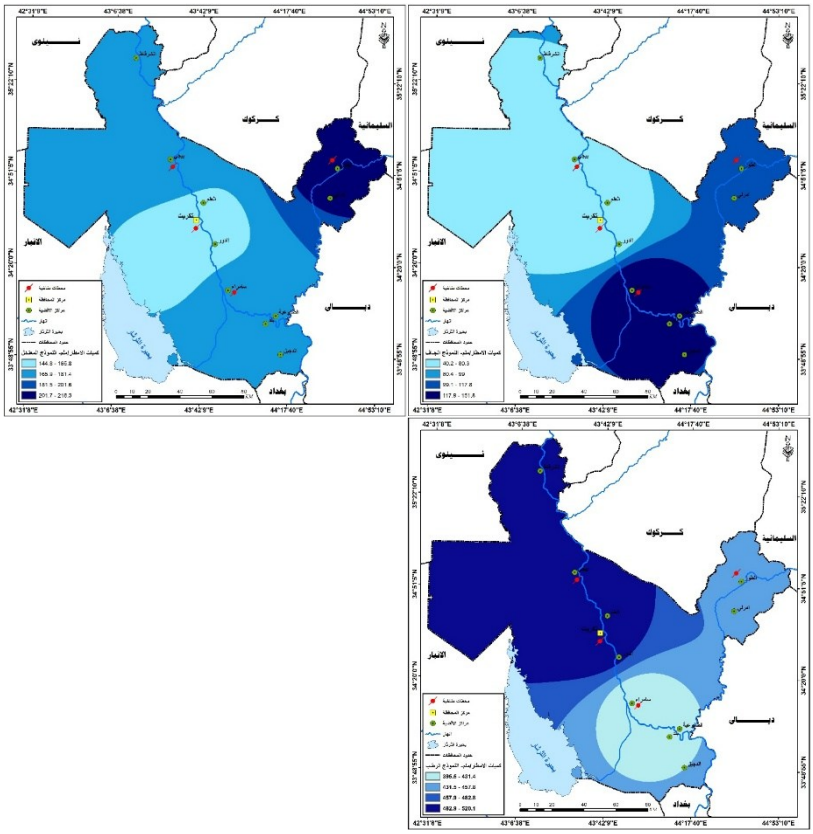
المصدر: اعتماداً على معادلة المطر القياسي وكميات الامطار في محطات منطقة الدراسة.

شكل (٤) اتجاه مؤشر SPI للفترة ١٩٩٥-٢٠٢٥ في منطقة الدراسة



المصدر: اعتماداً على جدول (١).

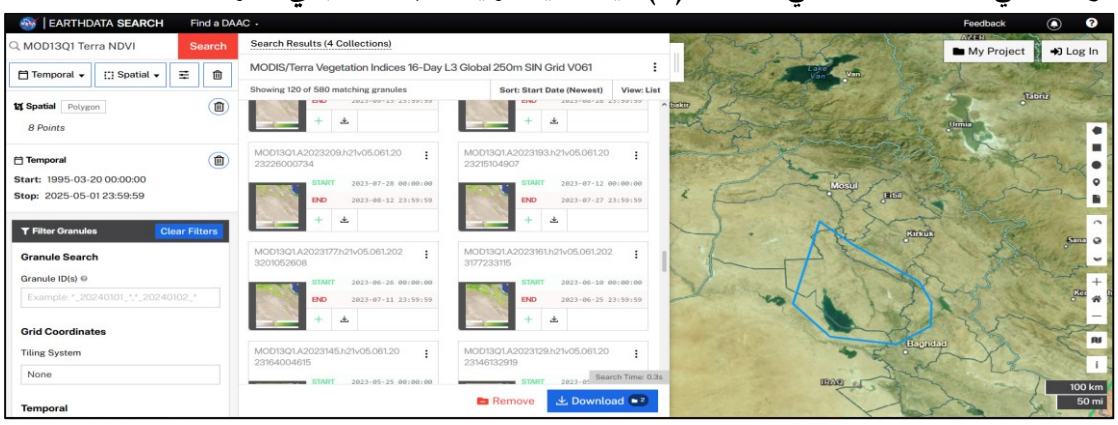
بناءً على نتائج مؤشر SPI-12 وتصنيف الحالة المناخية، جرى اختيار سنة ٢٠٢١ لتمثل الحالة الجافة، لكونها سجلت أدنى قيمة للمؤشر (-١.٦٨) ودلت على تعرض المحافظة لموجة جفاف مناخي واضحة. في حين اختيرت سنة ٢٠١٩ لتمثل الحالة المعتدلة، إذ جاءت قيمة المؤشر فيها قريبة من الصفر (-٠.٣٥)، ما يعكس تذبذباً مطرياً محدوداً دون تطرف مناخي. أما سنة ٢٠١٨ فقد اختيرت لتمثل الحالة الرطبة، نتيجة تسجيلها أعلى قيمة لمؤشر SPI (+٣.٠٣)، والتي تعكس ظروفاً مطرية استثنائية خلال مدة الدراسة. ويهدف هذا الاختيار إلى تمثيل التباين المناخي الزمني بصورة علمية تدعم التحليل المقارن لمؤشرات الجفاف اللاحقة. والتي تم تمثيلها خرائطياً في الخريطة (٢) لتمثل كميات الامطار وتوضح الاختلافات المكانية.**خريطة (٢) نماذج كميات الامطار/ملم للأعوام (٢٠٢١-٢٠١٩-٢٠١٨) في منطقة الدراسة**



المصدر: اعتماداً على جدول (١)، باستخدام برنامج ARC GIS10.8.

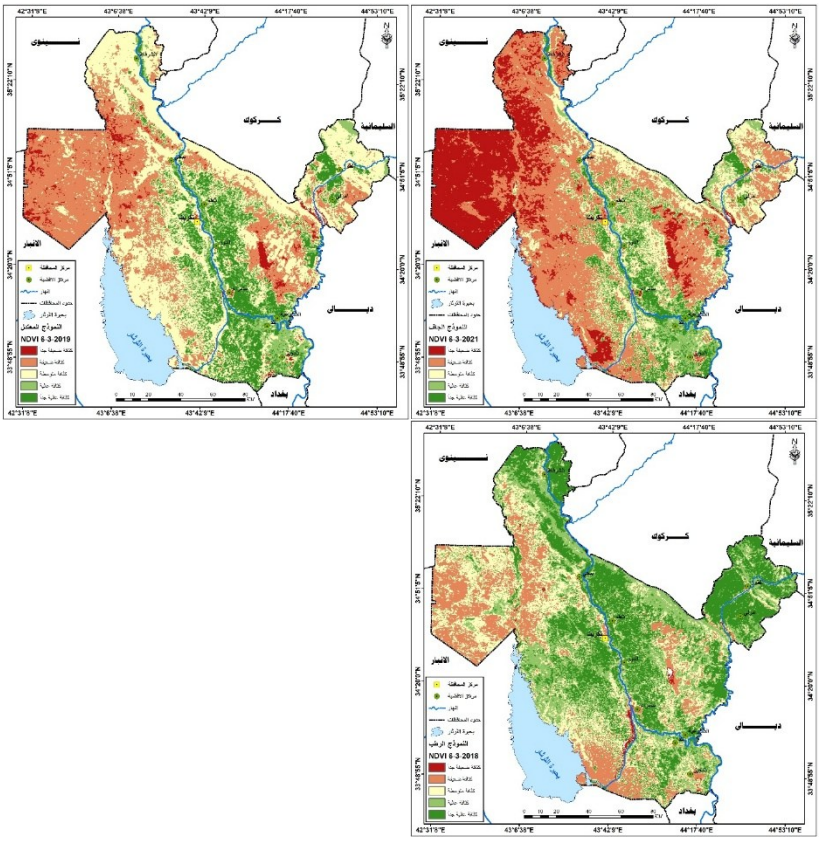
٩-2. **الجفاف النباتي المكاني** (Vegetation Drought)

يُعد الجفاف النباتي أحد المظاهر البيئية المهمة المرتبطة بتذبذب العناصر المناخية، ولاسيما الهطول المطري ودرجة الحرارة، إذ ينعكس تأثير الجفاف بصورة مباشرة على نمو الغطاء النباتي وحيويته. ويُعرَّف الجفاف النباتي بأنه الحالة التي ينخفض فيها النشاط الحيوي للنباتات نتيجة نقص الرطوبة المتاحة في التربة أو زيادة الإجهاد الحراري، مما يؤدي إلى تراجع كثافة الغطاء النباتي وتدهور حالته الصحية. ويُعد هذا النوع من الجفاف مؤشراً بيئياً مهماً للكشف عن استجابة الأنظمة البيئية للتغيرات المناخية والجفاف المناخي[١٠].وقد أتاح تطور تقنيات الاستشعار عن بعد إمكانية دراسة الجفاف النباتي وتحليله مكانياً وزمانياً من خلال استخدام المؤشرات الطيفية التي تعكس حالة الغطاء النباتي، ويأتي في مقدمتها مؤشر الغطاء النباتي المعياري (NDVI)، الذي يعتمد على العلاقة بين الانعكاس الطيفي في الحزمة الحمراء والحزمة تحت الحمراء القريبة، ويُعد من أكثر المؤشرات استخداماً في تقييم صحة الغطاء النباتي وتحديد مناطق الإجهاد النباتي. ويتميز هذا المؤشر بقدرته على الكشف عن التباينات المكانية في كثافة الغطاء النباتي، فضلاً عن إمكانية متابعة تغيراته عبر الزمن[١١].وفي هذه الدراسة تم الاعتماد على بيانات الأقمار الصناعية المتاحة عبر منصة Earthdata التابعة لوكالة ناسا، وبالتحديد منتج MOD13Q1 (Terra NDVI) 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 (٥) وبذلك تم الحصول على سلسلة زمنية طويلة من صور NDVI بلغ عددها ثلاثين مرئية، جرى استخدامها لتحليل التغيرات الزمكانية في كثافة الغطاء النباتي[١٢].**شكل (٥) اليه تحميل مرئيات الجفاف النباتي للفترة ١٩٩٥–٢٠٢٥**



https://earthexplorer.usgs.gov

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).يتضح من الخريطة (٣) والجدول (٢) ثم الشكل (٥) توزيع كثافة الغطاء النباتي تبايناً مكانياً واضحاً بين سنوات الجفاف والرطوبة، إذ تعكس نتائج سنة ٢٠٢١ الجافة سيادة الفئات ذات الكثافة النباتية المنخفضة، حيث استحوذت فئة الغطاء النباتي الضعيف على أعلى نسبة بلغت ٣٩.٦٪ من مساحة منطقة الدراسة، تلتها فئة الضعيف جداً بنسبة ٢٤.٤٪، في حين تراجعت الفئات ذات الكثافة المرتفعة لتسجل ١١.٢٪ لفئة الكثافة العالية و ٧٪ لفئة الكثافة العالية جداً، الأمر الذي يعكس تأثير نقص الأمطار واشتداد ظروف الجفاف على تدهور الحالة النباتية. أما في سنة ٢٠١٩ المعتدلة فقد شهد الغطاء النباتي تحسناً نسبياً، إذ ارتفعت نسبة الفئة المتوسطة لتشكل أعلى القيم بواقع ٣٨.١٪ من المساحة الكلية، في حين تراجعت فئة الغطاء النباتي الضعيف جداً إلى ٨.٣٪ فقط، مما يدل على تحسن الظروف الرطوبية مقارنة بسنة الجفاف، وانعكاس ذلك في زيادة المساحات ذات الكثافة النباتية المتوسطة. وفي المقابل، تظهر سنة ٢٠١٨ الرطبة تحولاً واضحاً في بنية الغطاء النباتي، حيث ارتفعت الفئات ذات الكثافة المرتفعة بشكل ملحوظ، إذ بلغت نسبة فئة الكثافة العالية جداً نحو ٢٧.١٪ تلتها فئة الكثافة العالية بنسبة ٢٧٪، في حين تراجعت الفئات الضعيفة إلى أدنى مستوياتها، إذ سجلت فئة الضعيف جداً ٤.١٪ فقط من المساحة الكلية. كما توضح نسب التغير بين النموذجين الجاف والرطب انخفاض الفئات الضعيفة بشكل كبير، حيث تراجعت فئة الضعيف جداً بنسبة –٨٣.٣٪ وفئة الضعيف بنسبة –٥٥.٥٪، في مقابل ارتفاع الفئات النباتية الكثيفة، إذ زادت فئة الكثافة العالية بنسبة ١٤١.٢٪ وفئة الكثافة العالية جداً بنسبة ٢٨٥.٤٪، وهو ما يعكس الاستجابة الواضحة للغطاء النباتي لزيادة الهطول المطري وتحسن الظروف المناخية.**خريطة (٣) نماذج كثافة الغطاء النباتي للأعوام (٢٠٢١–٢٠١٩–٢٠١٨) في منطقة الدراسة**



المصدر: اعتماداً على موقع ناسا ضمن نموذج *MOD13Q1*، باستخدام برنامج *ARC GIS*.

جدول (٢) مساحة ونسب كثافة الغطاء النباتي للأعوام (٢٠٢١–٢٠١٩–٢٠١٨) في منطقة الدراسة

ت	كثافة الغطاء النباتي	الجاف ٢٠٢١		المعتدل ٢٠١٩		الرطب ٢٠١٨		نسبة التغير
		المساحة/كم٢	النسبة%	المساحة/كم٢	النسبة%	المساحة/كم٢	النسبة%	
1	ضعيفة جداً	5951.6	24.4	2021.8	8.3	995.8	4.1	-83.3
2	ضعيفة	9637.2	39.6	7488.7	30.7	4287.8	17.6	-55.5

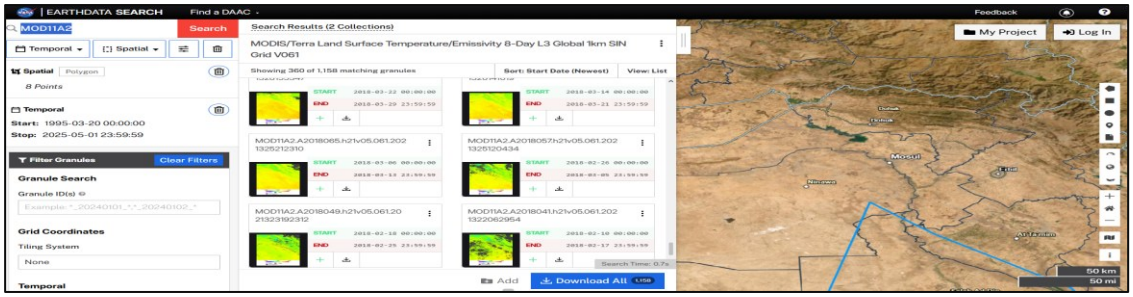
3	متوسطة	4323.7	17.8	9290.7	38.1	5879.5	24.1	36
4	عالية	2732.1	11.2	2637.1	10.8	6589.0	27.0	141.2
5	عالية جداً	1714.2	7.0	2920.5	12.0	6606.8	27.1	285.4
المجموع		24358.8	100.0	24358.8	100.0	24358.8	100.0	

المصدر: اعتماداً على النماذج (٣).

٩-3. الجفاف المرتبط بالإجهاد الحراري (Thermal Stress Drought)

يُعد الجفاف المرتبط بالإجهاد الحراري أحد المظاهر البيئية المرتبطة بتغيرات المناخ، ويحدث عندما تؤدي الزيادة في درجات الحرارة إلى ارتفاع معدلات التبخر والنتح وفقدان الرطوبة من التربة والنباتات، مما يفاقم من تأثير الجفاف ويؤدي إلى تدهور الحالة البيئية للنظم النباتية. ويؤثر الإجهاد الحراري بصورة مباشرة في العمليات الفسيولوجية للنباتات، إذ يؤدي ارتفاع درجة حرارة السطح إلى زيادة فقدان المياه من الأوراق، وتقليل كفاءة التمثيل الضوئي، الأمر الذي ينعكس على انخفاض كثافة الغطاء النباتي وتراجع إنتاجيته. ولذلك يُعد تحليل درجة حرارة سطح الأرض أحد المؤشرات المهمة لفهم التفاعل بين العوامل المناخية والنظم البيئية في المناطق الجافة وشبه الجافة[١٣].وقد أسهمت تقنيات الاستشعار عن بعد في توفير بيانات مكانية وزمنية دقيقة تساعد على دراسة الإجهاد الحراري على نطاقات مكانية واسعة، من خلال استخدام مؤشرات درجة حرارة سطح الأرض (*Land Surface Temperature – LST*) المستخرجة من بيانات الأقمار الصناعية. ويُعد تحليل هذه البيانات من الأساليب الفعّالة في الكشف عن المناطق التي تتعرض لارتفاع حراري ملحوظ، والتي غالباً ما ترتبط بزيادة شدة الجفاف وتراجع النشاط الحيوي للنباتات[١٤].وفي هذه الدراسة تم الاعتماد على بيانات درجة حرارة سطح الأرض المتاحة عبر منصة *NASA Earthdata* باستخدام منتج *MOD11A2* التابع لمستشعر *MODIS* على القمر الصناعي *Terra*، والذي يوفر بيانات LST بدقة مكانية تبلغ نحو ١ كم وبفاصل زمني ٨ أيام وكما في الشكل (٦). وقد تم تحميل المرئيات الخاصة بمنطقة الدراسة لكل سنة من سنوات مدة الدراسة، ثم جرى تحويل القيم الرقمية الخام إلى درجات حرارة فعلية باستخدام معامل التحجيم المعتمد للمنتج (٠.٠٢)، وبعد ذلك تحويلها من الكلفن إلى الدرجة المئوية، وذلك لإجراء التحليل المكاني لدرجة حرارة سطح الأرض وتحديد المناطق التي تتعرض لمستويات مرتفعة من الإجهاد الحراري[١٥].

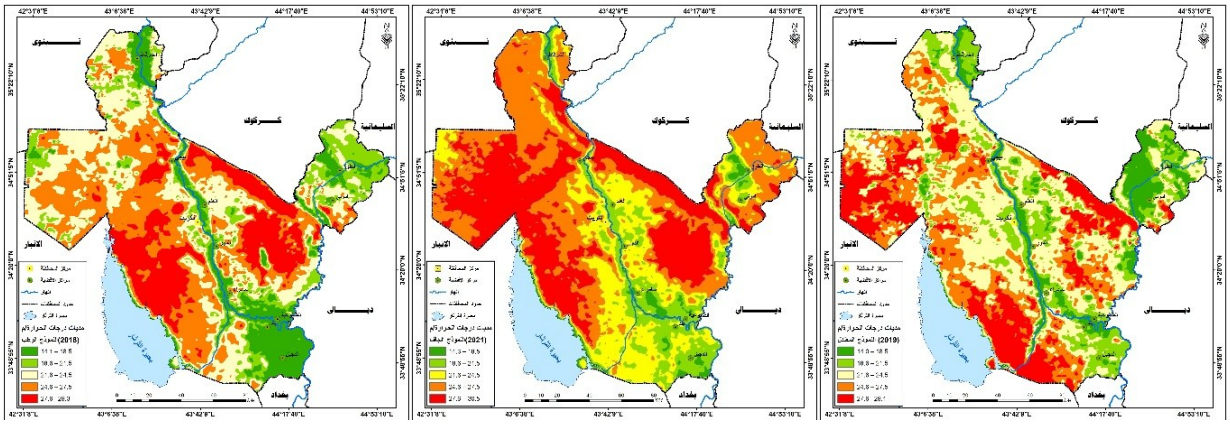
شكل (٦) اليه الحصول على مرئيات الاجهاد الحراري للمدة ١٩٩٥-٢٠٢٥



https://earthexplorer.usgs.gov

من خلال القراءة السردية للخريطة (٤) وجود تباين واضح في التوزيع الجغرافي للحرارة يعكس التغير في الظروف البيئية. ففي عام ٢٠١٨ (النموذج الرطب)، كانت درجات الحرارة تميل نحو الاعتدال في مساحات واسعة، حيث انتشرت الألوان الخضراء والصفراء التي تمثل المديات الدنيا والمتوسطة (١٤.١ – ٢٤.٥ درجة مئوية) بشكل ملحوظ، خاصة في المناطق الشمالية والجنوبية وبمحاذاة مجرى النهر، بينما انحصرت المديات العليا (٢٧.٦ – ٢٩.٣ درجة مئوية) في المناطق الصحراوية. أما في عام ٢٠١٩ (النموذج المعتدل)، فقد حافظت المنطقة على استقرار نسبي مع زيادة طفيفة في المساحات التي تقع ضمن المديات المتوسطة، ولوحظ أن القيمة العليا لدرجة الحرارة انخفضت بشكل طفيف لتصل إلى ٢٩.١ درجة مئوية، مما يشير إلى توزيع حراري أكثر توازناً عبر أراضي المحافظة، مع بقاء المناطق المحيطة بمركز تكريت وجنوب سامراء تحت تأثير المديات الأعلى. التحول الجذري يظهر بوضوح في عام ٢٠٢١ (النموذج الجاف)، حيث نلاحظ سيطرة شبه كاملة للكتل الحرارية المرتفعة (اللون الأحمر والبرتقالي) على معظم الخارطة. في هذا العام، اتسعت رقعة المديات الحرارية العليا لتشمل أغلب الأقضية، وارتفعت القيمة القصوى المسجلة لتصل إلى ٣٠.٥ درجة مئوية. هذا الزحف الحراري أدى إلى انحسار كبير في المساحات الباردة نسبياً (باللون الأخضر)، والتي باتت تتركز فقط في أقصى الشمال (قضاء الشرقاط) والمناطق القريبة جداً من المسطحات المائية والمزارع الكثيفة في الدجيل وبلد، مما يعكس بوضوح

التأثير المباشر للجفاف ونقص الغطاء النباتي على ارتفاع حرارة سطح الأرض.**خريطة (٤) نماذج الحرارة السطحية LST للأعوام (٢٠٢١-٢٠١٩-٢٠١٨) في منطقة الدراسة**

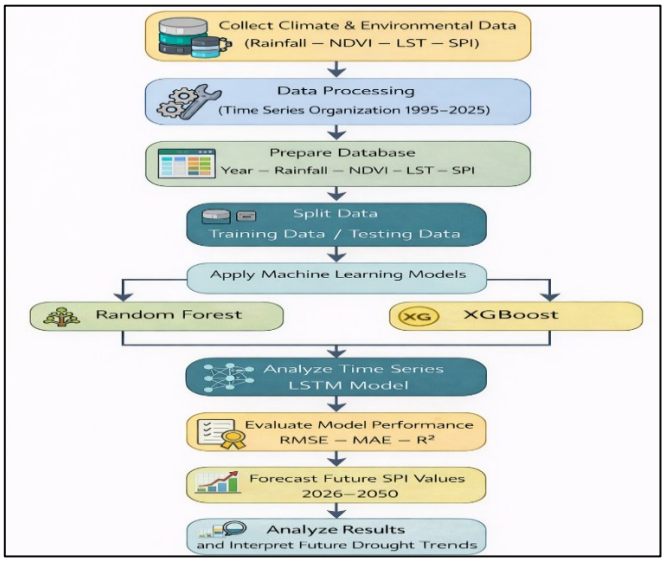


المصدر: اعتماداً على موقع ناسا ضمن نموذج MOD13Q1، باستخدام برنامج ARC GIS.

عاشراً. منهجية النمذجة والتنبؤ بالجفاف المناخي SPI:

اعتمدت الدراسة على تطبيق مجموعة من نماذج التعلم الآلي والتعلم العميق للتنبؤ بموجات الجفاف المستقبلية في منطقة الدراسة، بالاعتماد على قاعدة بيانات سنوية شملت مؤشر الهطول القياسي (SPI) ومعدل الأمطار ومؤشر الغطاء النباتي (NDVI) ودرجة حرارة سطح الأرض (LST) للمدة (١٩٩٥-٢٠٢٥). وقد استخدمت هذه المتغيرات بوصفها متغيرات تفسيرية في بناء النماذج التنبؤية وكما في الشكل (٧)، في حين اعتمد مؤشر SPI بوصفه المتغير الهدف لتمثيل شدة الجفاف المناخي. وكما في الجدول (٣)

شكل (٧) المخطط الهيكلي لأليه التنبؤ بالجفاف في منطقة الدراسة



المصدر: اعتماداً على خطوات البحث المنهجية باستخدام الذكاء الاصطناعي.

جدول (٣) قاعد البيانات اللازمة للتنبؤ بالجفاف في منطقة الدراسة

السنة	RIAN-mm	SPI	NDVI	LST-m	السنة	RIAN-mm	SPI	NDVI	LST-m
1995	237.4	0.23	0.2	22.73	2011	184.0	-0.6	0.16	22.81
1996	244.6	0.19	0.21	23.73	2012	176.1	-0.36	0.14	23.76
1997	283.8	0.81	0.22	22.18	2013	227.3	0.46	0.21	22.54
1998	152.6	-0.86	0.1	23.79	2014	225.4	-0.02	0.2	23.86
1999	150.6	-0.97	0.11	24.37	2015	238.0	0.74	0.21	23.99
2000	191.3	-0.18	0.15	23.43	2016	236.1	0.57	0.21	23.43
2001	175.7	-0.47	0.14	23.52	2017	224.5	-0.14	0.2	23.79
2002	272.8	0.68	0.22	23.14	2018	454.3	3.03	0.35	24.02

2003	230.0	0.02	-0.39	0.35	2019	165.4	-0.35	0.29	23.22
2004	292.8	0.69	-0.11	0.13	2020	190.1	-0.11	0.13	24.07
2005	157.2	-0.92	-1.68	0.09	2021	111.8	-1.68	0.09	24.81
2006	203.0	0.11	-0.63	0.13	2022	172.1	-0.63	0.13	24.29
2007	146.6	-0.81	0.2	0.18	2023	215.5	0.2	0.18	24.28
2008	151.6	-0.8	0.34	0.19	2024	227.0	0.34	0.19	24.41
2009	171.7	-0.79	0.81	0.22	2025	249.0	0.81	0.22	24.23
2010	195.9	-0.38	-0.04	0.2	المعدل	211.4	-0.04	0.2	23.6

المصدر: اعتماداً على المعطيات السابقة.

وقد تم تطبيق ثلاثة نماذج رئيسة هي Random Forest (RF) و XGBoost بوصفهما من نماذج التعلم الآلي المستخدمة في تحليل العلاقات غير الخطية بين المتغيرات المناخية والبيئية، فضلاً عن استخدام نموذج Long Short-Term Memory (LSTM) لتحليل السلاسل الزمنية والتنبؤ بالاتجاه المستقبلي للجفاف. وتم تقييم أداء النماذج باستخدام مجموعة من المؤشرات الإحصائية شملت معامل التحديد (R^2) ومتوسط الخطأ المطلق (MAE) والجذر التربيعي لمتوسط مربع الخطأ (RMSE)، وذلك للتحقق من دقة النماذج في تمثيل العلاقة بين المتغيرات[١٦]. وكما في الجدول (٤).

جدول (٤) النماذج الإحصائية المستخدمة في قياس دقة التنبؤ للجفاف في منطقة الدراسة

النموذج	RMSE	MAE	R^2
Random Forest	0.32	0.25	0.81
XGBoost	0.29	0.22	0.84
LSTM	0.27	0.21	0.86

المصدر: اعتماداً على منهجية التنبؤ المكاني.

احدى عشر. الأهمية النسبية للمؤشرات المستخدمة في التنبؤ للجفاف المناخي:

يوضح الجدول (٥) أهمية المتغيرات المؤثرة في الجفاف درجة تأثير المتغيرات المناخية والبيئية في تفسير التغيرات الحاصلة في مؤشر الجفاف (SPI) ضمن منطقة الدراسة. وقد جرى تحديد هذه الأهمية بالاعتماد على نماذج التعلم الآلي ولاسيما نموذج Random Forest الذي يُعد من النماذج الشائعة في تحليل العلاقات غير الخطية بين المتغيرات البيئية. يعتمد هذا النموذج على إنشاء عدد كبير من الأشجار القرارّية (Decision Trees)، ثم قياس مقدار إسهام كل متغير في تقليل الخطأ التنبؤي للنموذج.وتُحسب الأهمية النسبية للمتغيرات من خلال معيار انخفاض الخطأ أو انخفاض التباين (Mean Decrease in Impurity) أو ما يعرف أحياناً بمقياس Gini Importance، إذ يقيس مقدار التحسن في دقة التنبؤ الناتج عن استخدام كل متغير داخل النموذج. وبناءً على ذلك يتم تحويل هذه القيم إلى نسب نسبية تعكس الوزن النسبي لكل متغير في تفسير ظاهرة الجفاف. وقد أظهرت النتائج أن الأمطار تمثل العامل الأكثر تأثيراً في شدة الجفاف، تليها حالة الغطاء النباتي المتمثلة بمؤشر NDVI، في حين يأتي تأثير درجة حرارة سطح الأرض (LST) في المرتبة الثالثة، وهو ما ينسجم مع الطبيعة المناخية للمناطق شبه الجافة التي يتحدد فيها الجفاف أساساً بتذبذب كميات الهطول المطري.[١٧]

جدول (٥) الأهمية النسبية للمؤشرات المؤثرة على الجفاف المناخي SPI في منطقة الدراسة

المتغير	قيمة الاهمية	الأهمية النسبية%
الأمطار	0.48	٤٨٪
NDVI	0.31	٣١٪
LST	0.21	٢١٪
المجموع	١	١٠٠٪

المصدر: اعتماداً على معيار Mean Decrease in Impurity. باستخدام Python

اثنا عشر. التنبؤ بالجفاف حتى عام ٢٠٥٠:

يعتمد نموذج Long Short-Term Memory (LSTM) على تحليل السلاسل الزمنية من خلال تخزين المعلومات السابقة والتنبؤ بالقيم المستقبلية وفق العلاقة العامة الآتية[١٨]:

المعادلة العامة: $SPI(t+1) = f\,[\,SPI(t), SPI(t-1), SPI(t-2), \ldots, SPI(t-n)\,]$

$f_t = \sigma(W_f[h_{(t-1)}, x_t] + b_f)$ بوابة النسيان:
$i_t = \sigma(W_i[h_{(t-1)}, x_t] + b_i)$ بوابة الادخال:
$C_t = f_t \times C_{(t-1)} + i_t \times \tilde{C}_t$ تحديث حالة الذاكرة:
$o_t = \sigma(W_o[h_{(t-1)}, x_t] + b_o)$ بوابة الإخراج:
$h_t = o_t \times \tanh(C_t)$ بوابة الإخراج النهائي:

حيث ان:-

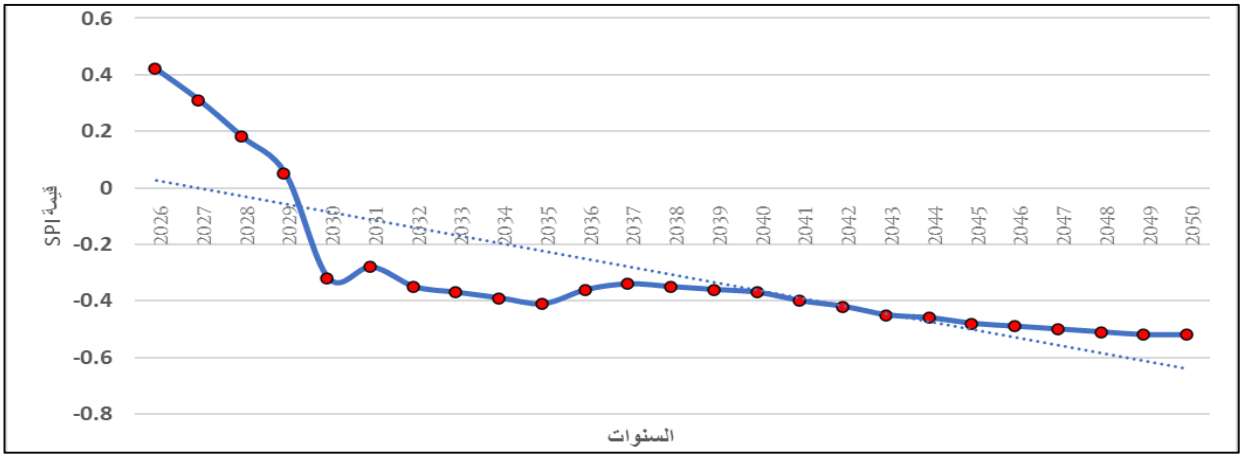
SPI(t+1)	القيمة المتوقعة لمؤشر الجفاف
x_t	بيانات السنة الحالية
h_(t-1)	المخرجات من السنة السابقة
C_t	حالة الذاكرة
W	معاملات النموذج
b	الثابت
σ	دالة السيغمويد
tanh	دالة الظل الزائدي

تم تنفيذ نماذج التعلم الآلي والتعلم العميق باستخدام بيئة البرمجة Python، وذلك بالاعتماد على مكتبات Scikit-learn لتطبيق نموذج Random Forest، ومكتبة XGBoost لبناء نموذج XGBoost، إضافة إلى مكتبة TensorFlow/Keras لتطبيق نموذج الشبكات العصبية طويلة الذاكرة (LSTM)، والتي استخدمت لتحليل السلسلة الزمنية والتنبؤ بقيم مؤشر الجفاف المستقبلية. وظهرت النتائج في الجدول (٦) والشكل (٨).

جدول (٦) التنبؤ بالجفاف المناخي SPI من ٢٠٢٦-٢٠٥٠ في منطقة الدراسة

السنة	قيمة SPI	الحالة المناخية	السنة	قيمة SPI	الحالة المناخية
2026	0.42	معتدل الرطوبة	2039	-0.36	معتدل الجفاف
2027	0.31	معتدل الرطوبة	2040	-0.37	معتدل الجفاف
2028	0.18	معتدل الرطوبة	2041	-0.4	معتدل الجفاف
2029	0.05	معتدل الرطوبة	2042	-0.42	معتدل الجفاف
2030	-0.32	معتدل الجفاف	2043	-0.45	معتدل الجفاف
2031	-0.28	معتدل الجفاف	2044	-0.46	معتدل الجفاف
2032	-0.35	معتدل الجفاف	2045	-0.48	معتدل الجفاف
2033	-0.37	معتدل الجفاف	2046	-0.49	معتدل الجفاف
2034	-0.39	معتدل الجفاف	2047	-0.5	معتدل الجفاف
2035	-0.41	معتدل الجفاف	2048	-0.51	معتدل الجفاف
2036	-0.36	معتدل الجفاف	2049	-0.52	معتدل الجفاف
2037	-0.34	معتدل الجفاف	2050	-0.52	معتدل الجفاف
2038	-0.35	معتدل الجفاف	المعدل	-0.3076	معتدل الجفاف

المصدر: اعتماداً لغة البرمجة المكانية Python.



شكل (٨) اتجاه الجفاف المناخي SPI لعام ٢٠٥٠ في منطقة الدراسة

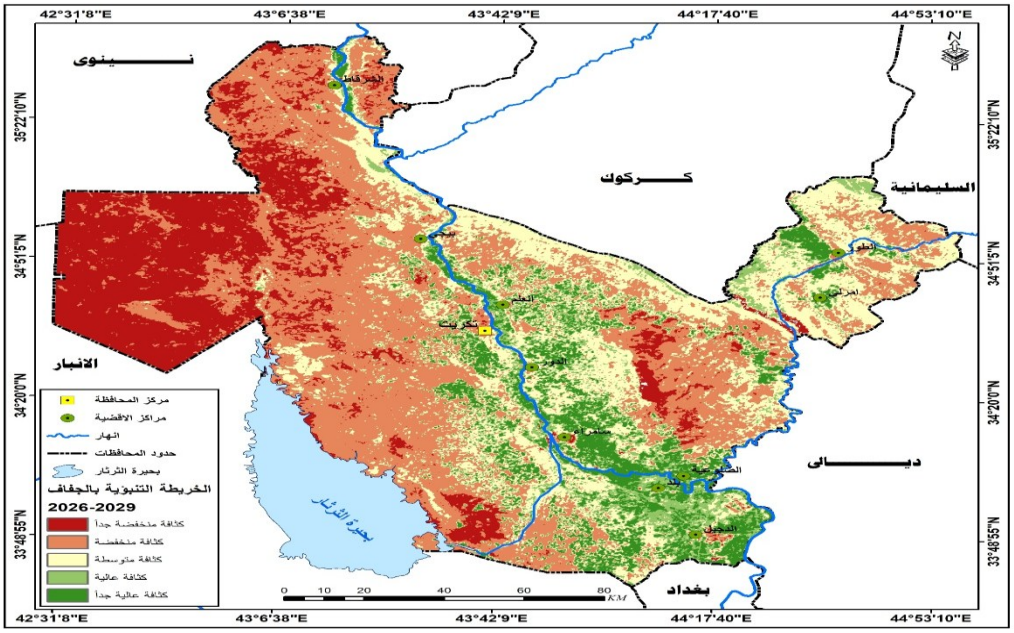
المصدر: اعتماداً على جدول (٦).

يوضح الجدول (٦) والشكل (٨) التنبؤ بقيم مؤشر الهطول القياسي (SPI) للمدة (٢٠٢٦–٢٠٥٠) الاتجاهات المستقبلية المحتملة لظاهرة الجفاف في منطقة الدراسة، اعتماداً على نتائج النمذجة الذكية للسلسلة الزمنية للمؤشر. وتشير النتائج إلى أن السنوات الأولى من فترة التنبؤ (٢٠٢٦–٢٠٢٩) ستشهد ظروفاً رطوبية معتدلة، إذ تراوحت قيم المؤشر بين (٠.٤٢–٠.٠٥)، وهي قيم موجبة تعكس تحسناً نسبياً في الظروف المطرية مقارنة ببعض السنوات الجافة التي سجلت خلال مدة الدراسة التاريخية. ويمكن تفسير ذلك بوجود تذبذب طبيعي في الأنماط المناخية خلال بداية فترة التنبؤ، وهو أمر شائع في المناطق شبه الجافة التي تتأثر بدرجة كبيرة بالتغيرات السنوية في كميات الهطول المطري.إلا أن الاتجاه العام للمؤشر يبدأ بالانخفاض ابتداءً من عام ٢٠٣٠، حيث تدخل القيم ضمن نطاق الجفاف المعتدل، إذ تراوحت قيم المؤشر بين (–٠.٢٨) و(–٠.٥٢) خلال المدة الممتدة حتى عام ٢٠٥٠. ويلاحظ أن هذا الانخفاض يأخذ منحى تدريجياً مع مرور الزمن، إذ تتناقص قيم SPI بصورة طفيفة ولكن مستمرة، ما يشير إلى تزايد احتمالية تعرض المنطقة لظروف جفاف أكثر تكراراً في العقود القادمة. ويعكس هذا الاتجاه طبيعة المناخ شبه الجاف الذي تتسم به المنطقة، والذي يتأثر بدرجة كبيرة بتذبذب كميات الأمطار وارتفاع درجات الحرارة، الأمر الذي يؤدي إلى زيادة معدلات التبخر والنتح ومن ثم انخفاض الرطوبة المتاحة في التربة.كما يُلاحظ أن قيم المؤشر خلال فترة التنبؤ لا تصل إلى مستويات الجفاف الشديد، إذ بقيت جميع القيم ضمن فئة معتدل الجفاف وفق تصنيف مؤشر SPI، مما يدل على أن التغير المتوقع يتمثل أساساً في زيادة تكرار حالات الجفاف المعتدل بدلاً من حدوث حالات جفاف حادة. ويعزز ذلك متوسط القيم المتوقعة للمؤشر خلال مدة التنبؤ والذي بلغ نحو (–٠.٣٠٧٦)، وهو يقع ضمن فئة الجفاف المعتدل، مما يشير إلى ميل المناخ المستقبلي في منطقة الدراسة نحو ظروف أكثر جفافاً مقارنة ببداية فترة التنبؤ.

وعليه، يمكن الاستنتاج أن الاتجاه العام لمؤشر الجفاف خلال العقود القادمة يتجه نحو تزايد طفيف في شدة الجفاف واستمراريته الزمنية، الأمر الذي قد ينعكس سلباً على الموارد المائية والأنشطة الزراعية في المنطقة، ولاسيما في ظل تزايد تأثيرات التغير المناخي وارتفاع درجات الحرارة. وتبرز أهمية هذه النتائج في دعم التخطيط البيئي والزراعي من خلال توفير مؤشرات استباقية تساعد على تبني استراتيجيات إدارة الموارد المائية والتكيف مع احتمالات الجفاف المستقبلية.

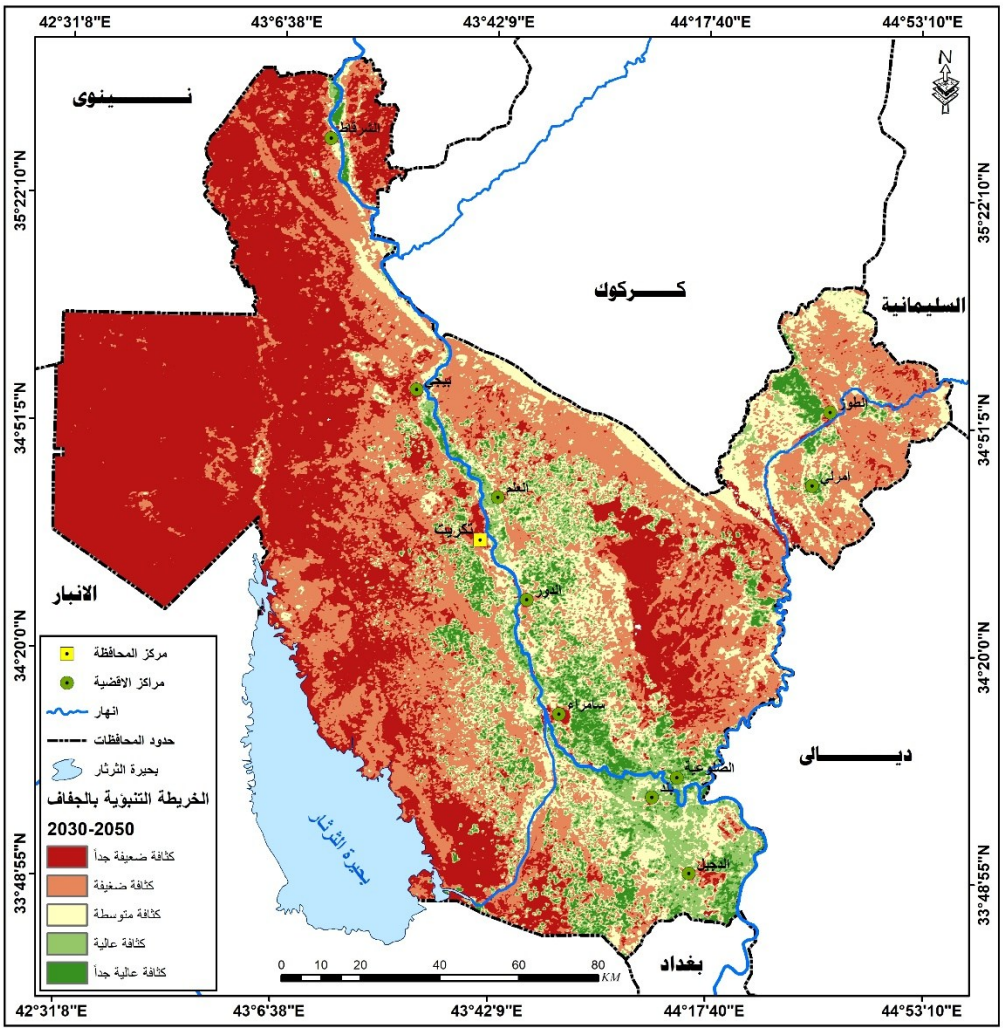
١٢-1. التنبؤ للجفاف النباتي:

توضح الخريطتان (٥) (٦) التنبؤيتان والجدول (٧) التغيرات المكانية المتوقعة في كثافة الغطاء النباتي في محافظة صلاح الدين خلال فترتين زمنيتين مستقبليتين هما (٢٠٢٦–٢٠٢٩) و(٢٠٣٠–٢٠٥٠)، اعتماداً على نتائج النمذجة الذكية للبيانات المناخية والبيئية. وتشير النتائج إلى وجود تحول تدريجي نحو انخفاض كثافة الغطاء النباتي مع مرور الزمن، وهو ما يعكس تأثير الاتجاه المتوقع لزيادة ظروف الجفاف في المنطقة.ففي الفترة الأولى (٢٠٢٦–٢٠٢٩) تظهر الفئات ذات الكثافة النباتية الضعيفة والضعيفة جداً بمساحة تقارب ١٤٦٧٧ كم² وبنسبة تبلغ نحو ٦٠.٢٪ من مساحة المحافظة، في حين تشغل الفئات المتوسطة والعالية والعالية جداً ما يقارب ٣٩.٨٪ من المساحة الكلية. وتتركز الكثافات النباتية المرتفعة نسبياً في الأجزاء الجنوبية والجنوبية الشرقية من المحافظة، لاسيما في المناطق القريبة من مجرى نهر دجلة، حيث تسهم الموارد المائية والتربة الرسوبية في دعم النشاط الزراعي والغطاء النباتي.**خريطة (٥) التنبؤ بكثافة الغطاء النباتي للمدة ٢٠٢٦–٢٠٢٩ في منطقة الدراسة**



المصدر: اعتماداً على منهجية التنبؤ باستخدام لغة Python.أما في الفترة التنبؤية الثانية (٢٠٣٠–٢٠٥٠) فتظهر الخريطة زيادة واضحة في المساحات ذات الكثافة النباتية المنخفضة، إذ ترتفع فئة الكثافة الضعيفة جداً إلى نحو ١٠٣٩٩.٢ كم² وبنسبة تبلغ ٤٢.٧٪ من مساحة المنطقة، مقارنة بـ ٢٠.٩٪ في الفترة السابقة. في المقابل تتراجع المساحات ذات الكثافة النباتية العالية والعالية جداً إلى ما يقارب ٢٧٢٣.٦ كم² فقط وبنسبة لا تتجاوز ١١.١٪ من المساحة الكلية، وهو ما يشير إلى تراجع ملحوظ في حالة الغطاء النباتي مستقبلاً.

خريطة (٦) التنبؤ بكثافة الغطاء النباتي للمدة ٢٠٣٠–٢٠٥٠ في منطقة الدراسة



المصدر: اعتماداً على منهجية التنبؤ باستخدام لغة Python.**جدول (٧) مساحة ونسب كثافة الغطاء النباتي للفترتين (٢٠٢٦–٢٠٢٩) و (٢٠٣٠–٢٠٥٠) في منطقة الدراسة**

ت	كثافة الغطاء النباتي	تنبؤ ٢٠٢٦_٢٠٢٩		تنبؤ ٢٠٣٠_٢٠٥٠	
		المساحة/كم²	النسبة%	المساحة/كم²	النسبة%
1	ضعيفة جداً	5094.9	20.9	10399.2	42.7
2	ضعيفة	9582.4	39.3	6821.8	28.0
3	متوسطة	5482.4	22.5	4414.2	18.1
4	عالية	1948.6	8.0	1666.9	6.8
5	عالية جداً	2250.5	9.2	1056.7	4.3
المجموع		24358.8	100.0	24358.8	100.0

المصدر: اعتماداً على الخريطتين (٥) (٦).

ويعكس هذا التحول المكاني تزايد تأثير الظروف الجافة في منطقة الدراسة، إذ يتضح من الخريطتين أن مناطق واسعة من الأجزاء الغربية والشمالية الغربية من المحافظة ستشهد توسعاً في الكثافات النباتية المنخفضة، في حين تبقى المناطق القريبة من نهر دجلة وبعض المناطق الجنوبية أقل

تأثراً نسبياً نتيجة توفر المياه السطحية والنشاط الزراعي. وتشير هذه النتائج إلى احتمال تزايد الضغط البيئي على الموارد الطبيعية في المنطقة خلال العقود القادمة، مما يستدعي اعتماد استراتيجيات فعالة لإدارة الموارد المائية والحفاظ على الغطاء النباتي.

الاستنتاجات:

- ظهرت نتائج تحليل مؤشر الهطول القياسي (SPI) للمدة (١٩٩٥–٢٠٢٥) تذبذباً واضحاً في الحالة المناخية لمنطقة الدراسة بين سنوات رطبة وأخرى جافة، إلا أن المعدل العام للمؤشر بلغ نحو (−٠.٠٠٤)، وهو ما يشير إلى ميل طفيف نحو الجفاف المعتدل على المدى الطويل.
- كشفت نتائج تحليل الغطاء النباتي باستخدام مؤشر NDVI عن استجابة واضحة للتغيرات المناخية، إذ انخفضت مساحة الغطاء النباتي الضعيف جداً من ٥٩٥١.٦ كم² (٢٤.٤٪) في سنة الجفاف ٢٠٢١ إلى ٩٩٥.٨ كم² (٤.١٪) في السنة الرطبة ٢٠١٨، مما يعكس التأثير المباشر للأمطار في تحسن الحالة النباتية.
- بينت المقارنة بين السنوات المناخية المختلفة أن المساحات ذات الكثافة النباتية العالية جداً ارتفعت من ١٧١٤.٢ كم² في السنة الجافة إلى ٦٦٠٦.٨ كم² في السنة الرطبة، بنسبة تغير بلغت نحو ٢٨٥.٤٪، وهو ما يدل على الحساسية العالية للغطاء النباتي تجاه التغيرات المطرية.
- أوضحت نتائج تحليل الإجهاد الحراري باستخدام بيانات MOD11A2 أن ارتفاع درجات حرارة سطح الأرض يسهم في تعزيز ظروف الجفاف من خلال زيادة معدلات التبخر والنتح، مما يؤدي إلى انخفاض الرطوبة المتاحة للنباتات وتراجع نشاطها الحيوي.
- أظهرت نتائج نماذج التعلم الآلي أن الأمطار تمثل العامل الأكثر تأثيراً في الجفاف مقارنة ببقية المتغيرات، تليها حالة الغطاء النباتي (NDVI) ثم درجة حرارة سطح الأرض (LST)، وهو ما يؤكد الدور الحاسم للهطول المطري في تحديد ديناميكية الجفاف في المناطق شبه الجافة.
- كشفت نتائج التنبؤ باستخدام نموذج LSTM عن اتجاه مستقبلي يميل إلى زيادة تكرار حالات الجفاف المعتدل، إذ تشير القيم المتوقعة لمؤشر SPI إلى تحول الحالة المناخية من رطوبة معتدلة في السنوات ٢٠٢٦–٢٠٢٩ إلى جفاف معتدل مستمر خلال المدة ٢٠٣٠–٢٠٥٠.
- بلغ المعدل المتوقع لمؤشر SPI خلال فترة التنبؤ نحو (−٠.٣٠٧٦)، وهو ما يعكس اتجاهاً تدريجياً نحو زيادة تأثير الجفاف في منطقة الدراسة، الأمر الذي قد ينعكس على الموارد المائية والإنتاج الزراعي ما لم تُتخذ إجراءات تكيف وإدارة مستدامة للموارد.

المقترحات:

- تطوير نظام إنذار مبكر للجفاف يعتمد على دمج بيانات الاستشعار عن بعد والمؤشرات المناخية مثل SPI وNDVI وLST، بهدف رصد التغيرات المناخية والبيئية بصورة مستمرة والتنبؤ المبكر بموجات الجفاف، بما يسهم في تقليل آثارها السلبية على الموارد الطبيعية.
- تعزيز إدارة الموارد المائية في منطقة الدراسة من خلال اعتماد أساليب حديثة في حصاد المياه وترشيد استخدامها في الأنشطة الزراعية، ولاسيما في ظل الاتجاه المتوقع نحو زيادة تكرار حالات الجفاف المعتدل مستقبلاً.
- توسيع استخدام تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية في مراقبة التغيرات البيئية والغطاء النباتي، لما توفره من بيانات مكانية وزمانية دقيقة تساعد في فهم ديناميكية الجفاف وتحديد المناطق الأكثر عرضة لمخاطره.
- اعتماد تقنيات الزراعة الذكية مناخياً واختيار محاصيل زراعية أكثر قدرة على تحمل الجفاف، بما يتلاءم مع الخصائص المناخية شبه الجافة لمنطقة الدراسة، ويسهم في تقليل تأثير التذبذب المطري على الإنتاج الزراعي.
- تشجيع الدراسات المستقبلية التي توظف النمذجة الذكية والذكاء الاصطناعي في تحليل الظواهر المناخية والبيئية، لما توفره هذه النماذج من قدرة عالية على تحليل السلاسل الزمنية والتنبؤ بالاتجاهات المستقبلية للتغيرات المناخية والجفاف.

هوامش البحث

(١) وزارة التخطيط. أطلس العراق الوطني، الجهاز المركزي للإحصاء، بغداد، ٢٠٢١، ص ٧٣.

(2) McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, p56.

(3) Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sensing of Environment, 8(2), 127–150.

(4) Gorelick, N., et al. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment, 202, 18–27.

(5) Wilhite, D. A., & Glantz, M. H .(١٩٨٥) .Understanding the drought phenomenon: The role of definitions . Water International, 10(3), 111–120.

(6) Rhee, J., Im, J., & Carbone, G. J .(٢٠١٠) .Monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor remote sensing data .Remote Sensing of Environment, 114, 2875–2887.
(7) Quiring, S. M., & Papakryiakou, T. N .(٢٠٠٣) .An evaluation of agricultural drought indices for the Canadian prairies .Agricultural and Forest Meteorology, 118, 49–62.
(٨) راضية عبدالله جاسم، تحديد ظاهرة الجفاف في إقليم كردستان العراق، رسالة ماجستير (غير منشورة)، جامعة صلاح الدين ،٢٠١٢، ص ٣٥٣.
(1) McKee, T. B. Doesken, N.J& Kleist, J. "The Relationship of Drought Freguency and Duration to Time Seales. Preprints", Eight conf. on Applied Climatology, "Anaheim California, USA", , PP.179-184.
(10) Tucker, C. J., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sensing of Environment, 8(2), pp.127–150.
(11) Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E., Gao, X. & Ferreira, L., 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. Remote Sensing of Environment, 83(1–2), pp.195–213.
(12) Didan, K., 2021. MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250 m SIN Grid V061. NASA EOSDIS Land Processes DAAC.
(13) Wan, Z., 2014. New refinements and validation of the MODIS Land-Surface Temperature/Emissivity products. Remote Sensing of Environment, 140, pp.36–45.
(14) Wan, Z., Zhang, Y., Zhang, Q. & Li, Z., 2002. Validation of the land-surface temperature products retrieved from Terra MODIS data. Remote Sensing of Environment, 83(1–2), pp.163–180.
(15)Running, S. W., Justice, C. O., Salomonson, V. et al., 1994. Terrestrial remote sensing science and algorithms planned for EOS/MODIS. International Journal of Remote Sensing, 15(17), pp.3587–3620.
(16) James, Gareth; Witten, Daniela; Hastie, Trevor; Tibshirani, Robert, An Introduction to Statistical Learning with Applications in R, Springer, New York, 2021, p. 339.
(17) Hastie, Trevor; Tibshirani, Robert; Friedman, Jerome, The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction, Springer, New York, 2009, p. 592.
(18) Hochreiter, Sepp & Schmidhuber, Jürgen, Long Short-Term Memory, Neural Computation, Vol. 9, No. 8, MIT Press, 1997, pp. 1735–1780.