العدد 14 مجلة دراسات في الإنسانيات والعلوم التربوية تموز 2026
No. 14 Journal of Studies in Humanities and Educational Sciences July 2026
Print ISSN 3006-3256 Online ISSN 3006-3264

(تقييم التدهور المحتمل للتربة والملاءمة الزراعية باستخدام المؤشرات الطيفية والرادارية وخرائط التربة الرقمية والبيانات المطرية في قضاء العلم/محافظة صلاح الدين للمدة 2020–2025)

الباحث زينه ليث صلاح
مكان العمل: جامعة تكريت كليه الزراعة
الأيميل:zina.l.so23@tu.edu.iq

الملخص
يهدف البحث إلى تقييم التدهور المحتمل للتربة والملاءمة الزراعية في قضاء العلم بمحافظة صلاح الدين للمدة 2020–2025، اعتماداً على نموذج مكاني تكاملي يجمع بين المؤشرات الطيفية والرادارية وخرائط التربة الرقمية والبيانات المطرية والطبوغرافية ضمن بيئة Google Earth Engine. استُخدمت مرئيات Sentinel-2لاشتقاق مؤشرات NDVI و SAVIو NDMIو BSIوSI_Brightness، وبيانات Sentinel-1 GRDلاستخلاص المؤشرات الرادارية الداعمة، ولا سيما الاستقطاب VH. كما استُخدمت بيانات Dynamic World لتحديد الأراضي الزراعية، و SoilGridsلتمثيل خصائص التربة السطحية عند عمق 0–5 سم، و CHIRPSلحساب المطر الموسمي وشذوذ الأمطار، و SRTMلاشتقاق الانحدار. اعتمدت الدراسة دقة تحليل نهائية مقدارها 250 م، بما يتلاءم مع دقة SoilGrids ويحد من المبالغة في الدقة المكانية عند دمج طبقات مختلفة المصدر والدقة .أظهرت النتائج أن المساحة الداخلة في التحليل بلغت 1479.12 كم². وشغلت فئة التدهور المحتمل العالي جداً 695.65 كم² بنسبة 47.03%، تليها فئة التدهور المتوسط بمساحة 601.44 كم² بنسبة 40.66%. أما الملاءمة الزراعية، فقد انحصرت ضمن الأصناف المتوسطة والعالية والعالية جداً، إذ شغلت الملاءمة العالية جداً 709.88 كم² بنسبة 47.99%. كما أظهرت خريطة العلاقة المكانية أن 97.94% من منطقة التحليل تقع ضمن علاقة انتقالية أو مختلطة بين التدهور المحتمل والملاءمة الزراعية، وكان الرمز 55، أي تدهور محتمل عالٍ جداً مع ملاءمة زراعية عالية جداً، النمط الأهم بمساحة 695.65 كم². ولم تُظهر نتائج Mann-Kendall دلالة إحصائية عند مستوى 95%، مما يعني أن الاتجاهات الزمنية خلال مدة الدراسة وصفية ولا تكفي لإثبات اتجاه طويل الأمد. وتؤكد الدراسة أن قضاء العلم يمتلك قابلية زراعية مكانية واضحة، لكنه معرض لضغوط تدهورية محتملة تتطلب إدارة مستدامة وتحققاً حقلياً ومختبرياً لاحقاً.
الكلمات المفتاحية :التدهور المحتمل للتربة، الملاءمة الزراعية، قضاء العلم.

Assessing Potential Soil Degradation and Agricultural Suitability Using Spectral and Radar Indicators, Digital Soil Maps, and Rainfall Data in Al-(Alam District/Salah Al-Din Governorate for the Period 2020–2025

Researcher: Zeina Laith Salah
Workplace: Tikrit University, College of Agriculture

Abstract
This study aims to assess potential soil degradation and agricultural suitability in Al-Alam District, Salah Al-Din Governorate, Iraq, during 2020–2025. An integrated geospatial model was developed in Google Earth Engine by combining spectral and radar indicators, digital soil maps, rainfall data, and topographic variables. Sentinel-2 imagery was used to derive NDVI, SAVI, NDMI, BSI, and SI_Brightness, while Sentinel-1 GRD data, especially VH polarization, supported the interpretation of surface conditions. Dynamic World was used to identify agricultural lands, SoilGrids represented surface soil properties at 0–5 cm depth,

CHIRPS was used for seasonal rainfall and rainfall anomaly, and SRTM was used to derive slope. The final spatial resolution was set to 250 m to match the SoilGrids resolution and avoid artificial spatial precision. The results showed that the analyzed area covered 1479.12 km². The very high potential degradation class occupied 695.65 km², representing 47.03%, followed by the moderate degradation class with 601.44 km² and 40.66%. Agricultural suitability was limited to moderate, high, and very high classes, with the very high suitability class occupying 709.88 km², representing 47.99%. The spatial relationship analysis showed that 97.94% of the analyzed area fell within a transitional or mixed relationship between potential degradation and agricultural suitability. The relationship code 55, representing very high potential degradation with very high agricultural suitability, was the dominant pattern. Mann-Kendall results showed no statistically significant temporal trends at the 95% level. Therefore, the detected trends should be interpreted as descriptive indicators rather than confirmed long-term trends. The study concludes that Al-Alam District has clear agricultural potential but is exposed to potential degradation pressures requiring sustainable land management and future field validation.

Sentinel-، Sentinel-1 ،SoilGrids ،CHIRPS ،Dynamic World ،Google Earth Engine،

المقدمة

تُعد التربة مورداً طبيعياً أساسياً للإنتاج الزراعي واستدامة النظم البيئية، لما تؤديه من دور في دعم نمو النبات، وخزن المياه، وتوفير العناصر الغذائية. وتزداد حساسية هذا المورد في البيئات الجافة وشبه الجافة نتيجة تذبذب الأمطار، وضعف الغطاء النباتي، وانكشاف سطح التربة، وممارسات الإدارة غير الملائمة. ويُقصد بتدهور التربة انخفاض قدرتها على أداء وظائفها الفيزيائية والكيميائية والحيوية، وقد يظهر ذلك من خلال تراجع المادة العضوية، أو زيادة التعرية، أو تراكم الأملاح، أو انخفاض الخصوبة والإنتاجية [1]. وتؤكد الإرشادات الدولية للإدارة المستدامة للتربة أهمية الحفاظ على المادة العضوية، وتحسين بناء التربة، وتقليل التعرية والانكشاف السطحي.[2]

في العراق، تمثل مشكلات تدهور الأراضي والتصحر وشح المياه وملوحة التربة تحديات بيئية وزراعية مؤثرة، ولا سيما في المناطق التي تتأثر بتذبذب الأمطار وتغير أنماط استعمالات الأراضي. وتشير التقارير والمبادرات الوطنية والدولية إلى أهمية تبني أساليب مستدامة لإدارة الأراضي الزراعية ومكافحة التصحر [3–4-5]. كما تدعم التوجهات العربية والإقليمية استخدام الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية في مراقبة تدهور الأراضي وتحديد أولويات الإدارة.[6]

تستند الملاءمة الزراعية إلى تقييم قدرة الأرض على دعم استعمال زراعي معين وفق خصائصها الطبيعية والبيئية، مثل التربة، والمناخ، والانحدار، والغطاء النباتي [7]. ومع تطور منصات الحوسبة السحابية الجغرافية، أصبح بالإمكان دمج بيانات فضائية وراداري ومطرية وتربوية ضمن نماذج مكانية متعددة المعايير. لذلك يهدف هذا البحث إلى تقييم التدهور المحتمل للتربة والملاءمة الزراعية في قضاء العلم للمدة 2020–2025، مع التأكيد على أن النتائج تمثل تقييماً نسبياً قائماً على المؤشرات، وليست بديلاً عن القياسات الحقلية والمختبرية.

مشكلة البحث

تتمثل مشكلة البحث في وجود تباين مكاني وزماني في مؤشرات الغطاء النباتي، والرطوبة السطحية، وانكشاف التربة، وخصائص التربة الرقمية، وكميات الأمطار في قضاء العلم خلال المدة 2020–2025، وهو ما قد يعكس اختلافاً في مستويات التدهور المحتمل للتربة وتفاوتاً في درجات الملاءمة الزراعية. وتزداد هذه المشكلة أهمية في البيئات شبه الجافة، إذ إن الاعتماد على المؤشرات الطيفية وحدها قد يؤدي إلى تقدير غير متوازن للتدهور، بسبب تأثرها بالجفاف، والموسمية الزراعية، والحصاد، والحراثة، وتغير حالة الغطاء النباتي.

وعليه، تتمحور مشكلة البحث في السؤال الرئيس الآتي: ما مدى قدرة الدمج بين المؤشرات الطيفية والرادارية وخرائط التربة الرقمية والبيانات المطرية والطبوغرافية على إنتاج تقييم مكاني أكثر توازناً للتدهور المحتمل للتربة والملاءمة الزراعية في قضاء العلم خلال المدة 2020–2025؟

فرضية البحث

يفترض البحث أن دمج المؤشرات الطيفية والرادارية وخرائط التربة الرقمية والبيانات المطرية والطبوغرافية يسهم في إنتاج تقييم مكاني أكثر توازناً للتدهور المحتمل للتربة والملاءمة الزراعية، مقارنة بالاعتماد على المؤشرات الطيفية المستخرجة من Sentinel-2 وحدها. كما يفترض البحث أن التدهور المحتمل والملاءمة الزراعية يتباينان مكانياً وزمانياً نتيجة تداخل عوامل الغطاء النباتي، والرطوبة السطحية، وانكشاف التربة، وخصائص التربة، وشذوذ الأمطار، والانحدار.

أهمية البحث

تنبع أهمية البحث من تناوله مورداً طبيعياً حساساً يرتبط مباشرة بالإنتاج الزراعي واستدامة الأراضي، وهو التربة، ضمن منطقة زراعية مهمة في محافظة صلاح الدين. وتتمثل الأهمية العلمية للدراسة في اعتمادها منهجاً تكاملياً لا يقتصر على المؤشرات الطيفية، بل يدمج معها البيانات الرادارية، وخرائط التربة الرقمية، والبيانات المطرية، والطبوغرافية، وقناع الأراضي الزراعية، مما يقلل من التفسير الأحادي للمؤشرات في البيئات شبه الجافة.

أما الأهمية التطبيقية فتتمثل في إنتاج خرائط مكانية تساعد على تحديد المناطق ذات الأولوية في الإدارة والحماية، وتشخيص الأراضي الأكثر عرضة للتدهور المحتمل، وتحديد المناطق ذات الملاءمة الزراعية الأعلى. كما يوفر البحث أساساً مكانياً قابلاً للتطوير مستقبلاً من خلال دعمه بعينات تربة وبيانات حقلية ومختبرية.

أهداف البحث

يهدف البحث إلى تقييم التدهور المحتمل للتربة والملاءمة الزراعية في قضاء العلم بمحافظة صلاح الدين خلال المدة 2020–2025، بالاعتماد على نموذج مكاني تكاملي متعدد المصادر. ويتفرع عن هذا الهدف الرئيس عدد من الأهداف الفرعية:

بناء نموذج مكاني لتقدير التدهور المحتمل للتربة اعتماداً على المؤشرات الطيفية والرادارية وخصائص التربة الرقمية والبيانات المطرية والطبوغرافية.

بناء نموذج لتقييم الملاءمة الزراعية يدمج مؤشرات الغطاء النباتي والرطوبة وخصائص التربة والانحدار وشذوذ الأمطار.

مقارنة نتائج نموذج Sentinel-2 الأساسي مع النموذج المتكامل لبيان أثر دمج مصادر البيانات المتعددة في تحسين التفسير المكاني.

تحليل العلاقة المكانية بين أصناف التدهور المحتمل وأصناف الملاءمة الزراعية لتحديد المناطق التي تجمع بين القابلية الزراعية والضغط التدهوري المحتمل.

دراسة التغير السنوي خلال المدة 2020–2025، واختبار الاتجاه الزمني باستخدام Sen’s slope و-Mann Kendall.

تقييم استقرار مخرجات النموذج من خلال تحليل الحساسية وثقة النموذج، مع توضيح حدود التقييم القائم على المؤشرات مقارنة بالتحقق الحقلي والمختبري.

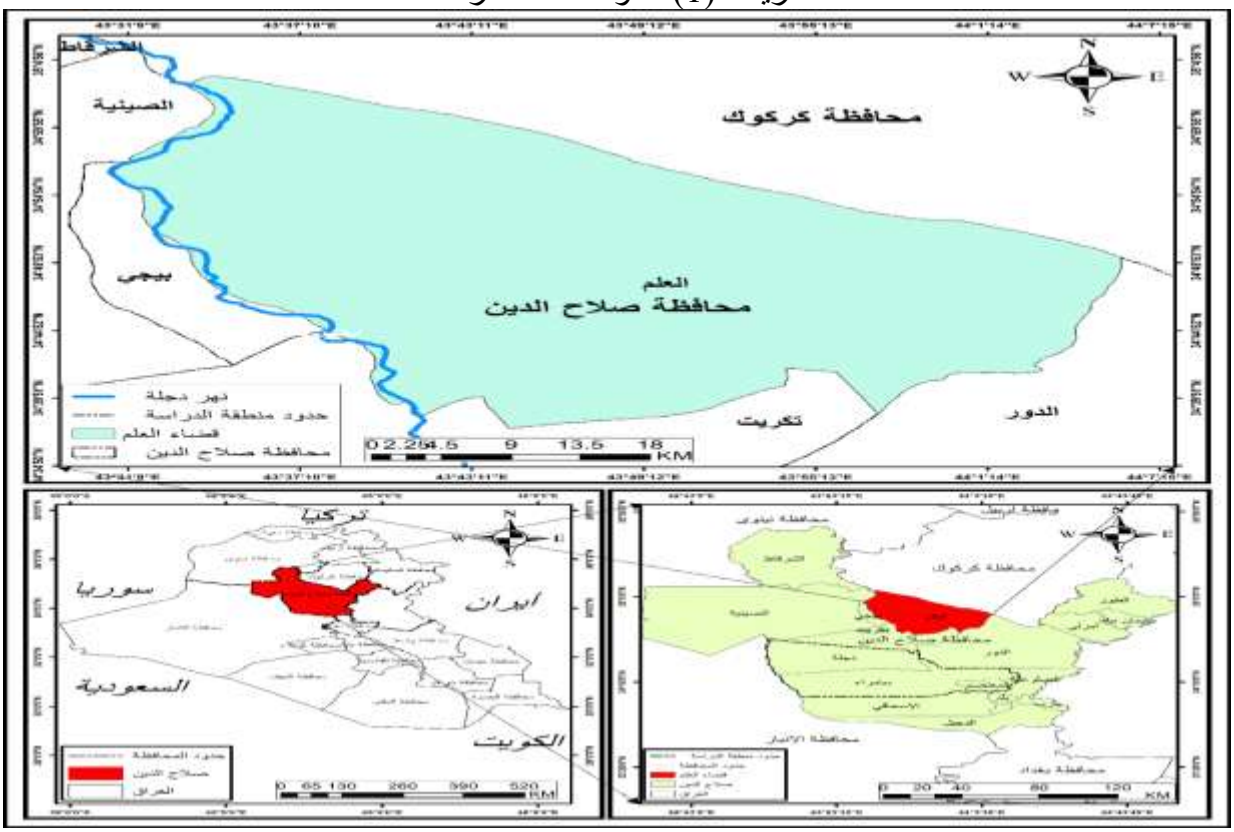
منطقة الدراسة

تقع منطقة الدراسة في قضاء العلم ضمن الجزء الشمالي الشرقي من محافظة صلاح الدين في العراق، كما يتضح من خريطة منطقة الدراسة. ويتمتع القضاء بموقع جغرافي انتقالي بين محافظة صلاح الدين ومحافظة كركوك، إذ تجاور محافظة كركوك حدوده الشمالية والشمالية الشرقية، في حين يقع قضاء الدور إلى الجهة الجنوبية الشرقية، ويمتد قضاء تكريت باتجاه الجنوب والجنوب الغربي، بينما تظهر مناطق بيجي والصينية إلى الغرب والشمال الغربي من منطقة الدراسة. كما يمر نهر دجلة بمحاذاة أجزاء من الجهة الغربية للقضاء، مما يمنح المنطقة أهمية مكانية وزراعية وبيئية واضحة.

فلكياً، تقع منطقة الدراسة ضمن نطاق إحداثي يمتد، بين خطي الطول الشرقيين 43°31′09″E و 44°07′15″E، وبين دائرتي العرض الشماليتين 34°36′50″N و 35°01′55″N. ويتخذ الامتداد الفعلي لحدود قضاء العلم داخل هذا النطاق شكلاً غير منتظم، إذ يمتد من الجهة الغربية قرب مجرى نهر دجلة باتجاه الشرق والجنوب الشرقي، مع اتساع نسبي في الأجزاء الوسطى والشرقية من القضاء.

تمتد الحدود الزمانية للبحث من سنة 2020 إلى سنة 2025، واعتمد موسم التحليل الممتد من 1 آذار إلى 30 أيلول من كل سنة. أما الحدود الموضوعية فتقتصر على تقييم التدهور المحتمل والملاءمة الزراعية اعتماداً على المؤشرات الفضائية والخرائط الرقمية والبيانات المطرية، دون الادعاء بأنها قياسات مختبرية مباشرة للتربة.

خريطة (1) حدود منطقة الدراسة



المصدر: عمل الباحث بالاعتماد على:-

1- وزارة الموارد المائية، الهيئة العامة للمساحة، قسم انتاج الخرائط خريطة العراق الإدارية، بمقياس 1: 1000000 بغداد 2011.

2- وزارة التخطيط دائرة التنمية الإقليمية والمحلية، شعبة نضم المعلومات الجغرافية خريطة الوحدات الإدارية لمحافظة صلاح الدين مقياس 1: 50000 كم لعام 2018.

البيانات وطرائق العمل

اعتمد البحث على مجموعة من البيانات المكانية والزمنية متعددة المصادر، جرى دمجها ومعالجتها ضمن بيئةGoogle Earth Engine ، لما توفره من قدرة على تحليل المرئيات الفضائية والبيانات الجغرافية ضمن نطاقات مكانية وزمانية واسعة [8]. شملت البيانات مرئياتSentinel-2 SR Harmonized ، وبيانات Sentinel-1 GRD، وDynamic World، وSoilGrids، وCHIRPS، وSRTM، إضافة إلى حدود قضاء العلم.

جدول (1) مصادر البيانات المستخدمة في البحث

المصدر	نوع البيانات	الاستخدام في البحث	الدقة/المقياس المعتمد	الإحالة
Sentinel-2 SR Harmonized	مرئيات طيفية	حساب NDVI وSAVI وNDMI وBSI وSI_Brightness	10–20م، ثم 250 م	[9 –15–17]
Sentinel-1 GRD	بيانات رادارية SAR	استخلاص VV وVH ومؤشرات داعمة لحالة السطح	نحو 10 م، ثم 250 م	[10]
Dynamic World	احتمالية الغطاء الأرضي	تحديد الأراضي الزراعية وتقليل الخلط مع غير الزراعية	10:00م	[11]
SoilGrids	خرائط تربة رقمية	SOC وpH وCEC وBDOD والقوام والنتروجين	250م	[12]
CHIRPS	بيانات مطرية يومية	المطر الموسمي وشذوذ الأمطار	0.05درجة تقريباً	[13]
SRTM	نموذج ارتفاع رقمي	اشتقاق الانحدار	نحو 30 م	[14]

المصدر :إعداد الباحث بالاعتماد على مصادر البيانات الفضائية والرقمية المستخدمة في البحث ضمن بيئة Google Earth Engine

تمت معالجة مرئيات Sentinel-2 خلال موسم آذار–أيلول من كل سنة، مع تطبيق قناع SCL لاستبعاد السحب والظلال والمياه والبكسلات غير الصالحة، ثم إنتاج مركبات سنوية بطريقة الوسيط. واستُخرجت مؤشرات NDVI و SAVIو NDMIو BSIو .SI_Brightnessويمثل NDVI حالة وكثافة الغطاء النباتي [15]، بينما يقلل SAVI أثر سطوع التربة في المناطق قليلة الغطاء النباتي [16]، ويمثل NDMI مؤشراً غير مباشر لرطوبة النبات/السطح استناداً إلى العلاقة بين الحزم القريبة وتحت الحمراء القصيرة [17].

أما بيانات Sentinel-1 فقد عولجت بنمط IW وبالاستقطابين VV وVH، واستُخدمت قيم VH بوصفها مؤشراً داعماً لحالة السطح والرطوبة النسبية وبنية الغطاء الزراعي، وليس قياساً مباشراً لرطوبة التربة [10]. واستُخدمت Dynamic World لبناء قناع الأراضي الزراعية اعتماداً على احتمالية فئة Crops [11].كما استُخرجت خصائص التربة الرقمية من SoilGrids عند عمق 0–5 سم [12]، وحُسب المطر الموسمي وشذوذ الأمطار من CHIRPS مقارنة بخط الأساس 1981–2019 [13]، واستُخرج الانحدار من SRTM [14].

بُني نموذجا التدهور المحتمل والملاءمة الزراعية اعتماداً على منهج مكاني متعدد المعايير، بعد تحويل جميع المؤشرات إلى درجات معيارية من 1 إلى 5. في نموذج التدهور، تشير القيم الأعلى إلى احتمالية تدهور أعلى، بينما تشير القيم الأعلى في نموذج الملاءمة إلى ملاءمة زراعية أفضل. وتم اعتماد دقة نهائية مقدارها 250 م في الدمج النهائي انسجاماً مع دقةSoilGrids ، ولتجنب إنتاج دقة مكانية زائفة.

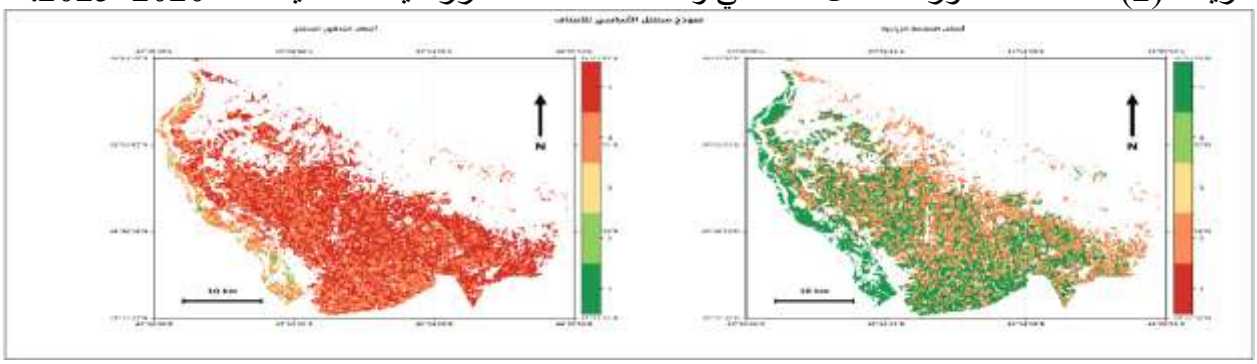
النتائج

8.1.مقارنة نموذج Sentinel-2 الأساسي بالنموذج المتكامل

اعتمد نموذج Sentinel-2الأساسي على المؤشرات الطيفية المستخرجة من مرئيات Sentinel-2 لتقييم التدهور المحتمل والملاءمة الزراعية في قضاء العلم خلال المدة 2020–2025. وقد استُخدم هذا النموذج بوصفه خط أساس للمقارنة مع النموذج المتكامل، بهدف بيان حدود الاعتماد على المؤشرات البصرية في بيئة شبه جافة تتأثر بالموسمية، وتذبذب الأمطار، وتغير حالة الغطاء النباتي. وتجدر الإشارة إلى أن نموذج الملاءمة الزراعية الأساسي تضمن أيضاً عامل الانحدار، لذلك فهو يمثل نموذجاً أساسياً معتمداً على مؤشرات Sentinel-2ومدعوماً بالعامل الطبوغرافي.

يمثل الشكل (2) الأصناف النهائية المصنفة للتدهور المحتمل الأساسي والملاءمة الزراعية الأساسية، بما يتوافق مع فئات المساحة والنسب المعروضة في جدولي (4) و(5). وتشير القيم من 1 إلى 5 في خريطة التدهور المحتمل إلى تدرج مستوى التدهور من منخفض جداً إلى عالٍ جداً، بينما تشير القيم نفسها في خريطة الملاءمة الزراعية إلى تدرج الملاءمة من منخفضة جداً إلى عالية جداً.

خريطة (2) أصناف التدهور المحتمل الأساسي وأصناف الملاءمة الزراعية الأساسية للمدة 2020–2025.



المصدر :مخرجات Google Earth Engine.

جدول (2) أصناف التدهور المحتمل الأساسي للمدة 2020–2025

الصنف	التفسير	المساحة كم²	النسبة %
1	منخفض جداً	4.5	0.3
2	منخفض	16.36	1.11
3	متوسط	31.06	2.1
4	عالٍ	555.67	37.57
5	عالٍ جداً	871.53	58.92

المصدر : إعداد الباحث بالاعتماد على مخرجات نموذج Sentinel-2 الأساسي ضمن بيئة Google Earth Engine.

جدول (3) أصناف الملاءمة الزراعية الأساسية للمدة 2020–2025

الصنف	التفسير	المساحة كم²	النسبة %
1	ملاءمة منخفضة جداً	0.1	0.01
2	ملاءمة منخفضة	649.76	43.93
3	ملاءمة متوسطة	105.02	7.1
4	ملاءمة عالية	22.99	1.55
5	ملاءمة عالية جداً	701.25	47.41

المصدر: إعداد الباحث بالاعتماد على مخرجات نموذج Sentinel-2 الأساسي ضمن بيئة Google Earth Engine.

أظهرت نتائج نموذج Sentinel-2 الأساسي هيمنة واضحة لفئتي التدهور المحتمل العالي والعالي جداً، إذ بلغت مساحتهما مجتمعتين 1427.20كم²، وبنسبة 96.49%من إجمالي مساحة الأراضي الداخلة في التحليل. فقد شغلت فئة التدهور المحتمل العالي جداً وحدها 871.53كم² بنسبة 58.92%، في حين شغلت فئة

التدهور المحتمل العالي 555.67كم² بنسبة 37.57%. أما الفئات المنخفضة والمتوسطة فقد جاءت بنسب محدودة، إذ لم تتجاوز مجتمعة 3.51% من مساحة التحليل.

تعكس هذه النتيجة الحساسية العالية للمؤشرات الطيفية المستخرجة من Sentinel-2 تجاه انخفاض الغطاء النباتي، وارتفاع درجة انكشاف التربة، وزيادة سطوع السطح، وهي خصائص تظهر بوضوح في البيئات الجافة وشبه الجافة. ومع ذلك، لا ينبغي تفسير ارتفاع أصناف التدهور المحتمل في هذا النموذج بوصفه دليلاً مباشراً على تدهور مختبري مؤكد للتربة، لأن المؤشرات البصرية قد تتأثر بعوامل موسمية وزراعية مؤقتة، مثل الجفاف، ومرحلة نمو المحاصيل، وموعد الحصاد، وتغير الدورة الزراعية.

أما نتائج الملاءمة الزراعية الأساسية فقد أظهرت تبايناً مكانياً واضحاً بين الفئات. إذ جاءت فئة الملاءمة المنخفضة بمساحة 649.76كم² وبنسبة 43.93%، بينما شغلت فئة الملاءمة العالية جداً 701.25كم² وبنسبة 47.41%. في المقابل، كانت فئتا الملاءمة المتوسطة والعالية محدودتين نسبياً، إذ بلغت نسبتهما 7.10% و1.55% على التوالي، في حين سجلت فئة الملاءمة المنخفضة جداً نسبة شبه معدومة بلغت 0.01%.

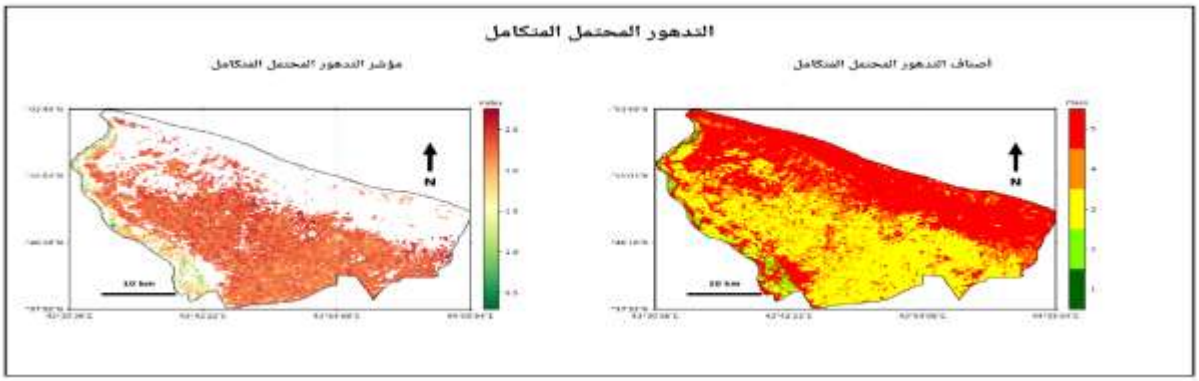
ويشير هذا التباين بين أصناف الملاءمة الزراعية إلى أن الاعتماد على نموذج Sentinel-2 الأساسي قد ينتج تقييماً حاداً في بعض المناطق، بسبب تأثر المؤشرات الطيفية بحالة الغطاء النباتي والرطوبة السطحية وقت الرصد. فقد تظهر بعض الأراضي بدرجات ملاءمة مرتفعة نتيجة تحسن الغطاء النباتي أو ملاءمة الظروف السطحية والانحدار، بينما تظهر أراضٍ أخرى بدرجات ملاءمة منخفضة نتيجة الانكشاف السطحي أو ضعف الغطاء النباتي خلال موسم معين.

وبناءً على ذلك، يُعد نموذج Sentinel-2 الأساسي مفيداً في الكشف الأولي عن التباين المكاني في حالة الغطاء النباتي والسطح، إلا أنه لا يكفي وحده لإنتاج تقييم متوازن للتدهور المحتمل والملاءمة الزراعية في منطقة تتأثر بالمطر والموسمية. ولذلك كان بناء النموذج المتكامل ضرورياً من خلال دمج البيانات الرادارية، وخرائط التربة الرقمية، والبيانات المطرية، والانحدار الطبوغرافي، بهدف تقليل أثر التفسير الأحادي للمؤشرات الطيفية وإنتاج تقييم مكاني أكثر اتزاناً

8.2.التدهور المحتمل المتكامل

تمثل خريطة التدهور المحتمل المتكامل أحد المخرجات الرئيسة في هذا البحث، لأنها تعكس نتيجة الدمج بين المؤشرات الطيفية والرادارية، وخصائص التربة الرقمية، وشذوذ الأمطار، والانحدار الطبوغرافي. ويهدف هذا الدمج إلى إنتاج تقييم مكاني أكثر توازناً للتدهور المحتمل مقارنة بالنماذج التي تعتمد على المؤشرات البصرية وحدها. ويوضح الشكل (6) التوزيع المكاني لمؤشر التدهور المحتمل المتكامل وأصنافه في قضاء العلم للمدة 2020–2025.

خريطة (3) مؤشر التدهور المحتمل المتكامل وأصنافه في قضاء العلم للمدة 2020–2025.



المصدر : مخرجات النموذج المتكامل ضمن بيئةGoogle Earth Engine .

جدول (4) أصناف التدهور المحتمل المتكامل للتربة في قضاء العلم للمدة 2020–2025

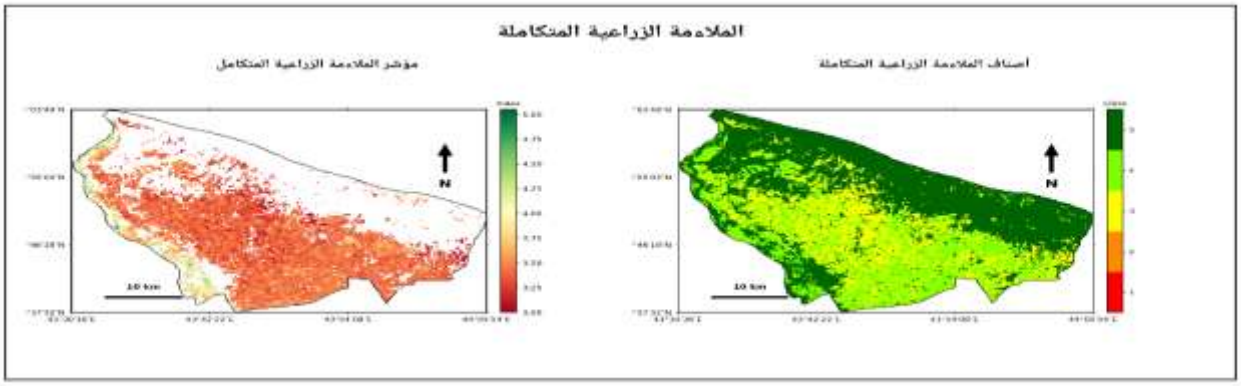
الصنف	التفسير	المساحة كم²	النسبة %
1	**تدهور محتمل منخفض جداً**	**1.96**	**0.13**
2	**تدهور محتمل منخفض**	**28.47**	**1.92**
3	**تدهور محتمل متوسط**	**601.44**	**40.66**
4	**تدهور محتمل عالٍ**	**151.61**	**10.25**
5	**تدهور محتمل عالٍ جداً**	**695.65**	**47.03**
المجموع	—	**1479.12**	**100**

المصدر :إعداد الباحث بالاعتماد على مخرجات النموذج المتكامل ضمن بيئة.Google Earth Engine
أظهرت نتائج التدهور المحتمل المتكامل أن الصنف الخامس، والمتمثل بالتدهور المحتمل العالي جداً، شغل المساحة الأكبر ضمن منطقة التحليل، إذ بلغ 695.65كم² وبنسبة 47.03%. وجاء بعده صنف التدهور المحتمل المتوسط بمساحة 601.44كم² وبنسبة 40.66%، ثم صنف التدهور المحتمل العالي بمساحة 151.61كم² وبنسبة 10.25%. أما صنفا التدهور المحتمل المنخفض والمنخفض جداً فقد سجلا مساحات محدودة بلغت 28.47كم² و 1.96كم² على التوالي، وبنسبة إجمالية لا تتجاوز 2.06% من مساحة التحليل.
وتشير هذه النتائج إلى أن معظم الأراضي الداخلة في التحليل تقع ضمن مستويات تتراوح بين التدهور المحتمل المتوسط والعالي جداً، إذ بلغت نسبتها مجتمعة 97.94% من المساحة المحللة. كما أن فئتي التدهور المحتمل العالي والعالي جداً وحدهما تمثلان 57.28%، وهو ما يدل على وجود ضغط تدهوري محتمل واضح في أجزاء واسعة من منطقة الدراسة.

ولا تعني هذه النتائج أن التربة فقدت صلاحيتها الزراعية أو أن التدهور مؤكد مختبرياً، وإنما تعني أن مجموعة المؤشرات المكانية المدمجة تكشف عن قابلية أعلى للتعرض لضغوط تدهورية محتملة. ويرتبط ذلك بتداخل عدة عوامل، من أبرزها حالة الغطاء النباتي، والرطوبة السطحية، وانكشاف التربة، وخصائص التربة الرقمية، وشذوذ الأمطار، والانحدار الطبوغرافي. لذلك ينبغي التعامل مع هذه الخريطة بوصفها مؤشراً مكانياً لتحديد المناطق ذات الأولوية في المتابعة والإدارة، وليس بديلاً عن القياسات الحقلية والمختبرية المباشرة.

8.3.الملاءمة الزراعية المتكاملة

تمثل خريطة الملاءمة الزراعية المتكاملة أحد المخرجات الرئيسة للنموذج المتكامل، إذ توضح القابلية الزراعية للأراضي الداخلة في التحليل ضمن قضاء العلم للمدة 2020–2025. وقد اعتمد هذا التقييم على دمج المؤشرات الطيفية والرادارية، وخصائص التربة الرقمية، وشذوذ الأمطار، والانحدار الطبوغرافي، بهدف إنتاج تقدير مكاني أكثر شمولاً للملاءمة الزراعية مقارنة بالاعتماد على المؤشرات الطيفية وحدها.
يوضح الشكل (7) التوزيع المكاني لمؤشر الملاءمة الزراعية المتكامل وأصنافه. وتبين الخريطة أن نتائج الملاءمة الزراعية انحصرت ضمن الأصناف المتوسطة والعالية والعالية جداً، في حين لم تسجل الأراضي الداخلة في التحليل أي مساحات ضمن صنفي الملاءمة المنخفضة جداً أو المنخفضة. ويعكس ذلك أن منطقة التحليل تمتلك، وفق المؤشرات المستخدمة في النموذج، قابلية زراعية رقمية جيدة نسبياً، مع وجود تباين مكاني واضح بين المناطق ذات الملاءمة المتوسطة والمناطق ذات الملاءمة العالية والعالية جداً.
خريطة (5) مؤشر الملاءمة الزراعية المتكامل وأصنافه في قضاء العلم للمدة 2020–2025.



المصدر :مخرجات النموذج المتكامل ضمن بيئة.Google Earth Engine

جدول (5) أصناف الملاءمة الزراعية المتكاملة في قضاء العلم للمدة 2020–2025

الصنف	التفسير	المساحة كم²	النسبة %
1	ملاءمة منخفضة جداً	0	0
2	ملاءمة منخفضة	0	0
3	ملاءمة متوسطة	334.16	22.59
4	ملاءمة عالية	435.08	29.41
5	ملاءمة عالية جداً	709.88	47.99
المجموع	—	1479.12	100

المصدر :إعداد الباحث بالاعتماد على مخرجات النموذج المتكامل ضمن بيئة.Google Earth Engine

أظهرت نتائج جدول (8) أن صنف الملاءمة العالية جداً شغل المساحة الأكبر ضمن الأراضي الداخلة في التحليل، إذ بلغ 709.88كم²، وبنسبة 47.99%من إجمالي مساحة التحليل. وجاء بعده صنف الملاءمة العالية بمساحة 435.08كم²، وبنسبة 29.41%، ثم صنف الملاءمة المتوسطة بمساحة 334.16كم²، وبنسبة 22.59%.أما صنفا الملاءمة المنخفضة جداً والمنخفضة فلم يسجلا أي مساحة ضمن مخرجات النموذج النهائي.

وتشير هذه النتائج إلى أن جميع الأراضي الداخلة في التحليل تقع ضمن مستويات ملاءمة متوسطة فأعلى، في حين بلغت مساحة الأراضي ذات الملاءمة العالية والعالية جداً معاً 1144.96كم²، وبنسبة 77.40%من إجمالي مساحة التحليل. وهذا يدل على أن جزءاً واسعاً من منطقة الدراسة يمتلك قابلية زراعية جيدة إلى جيدة جداً وفق النموذج المكاني المستخدم.

ويرتبط ارتفاع درجات الملاءمة الزراعية بعدد من العوامل الداعمة، ولا سيما خصائص التربة الرقمية مثل القوام المتوسط نسبياً، ودرجة تفاعل التربة القاعدية الخفيفة، والسعة التبادلية الكاتيونية المتوسطة إلى الجيدة، فضلاً عن محدودية الانحدار في أجزاء واسعة من منطقة الدراسة. كما تسهم المؤشرات المرتبطة بالغطاء النباتي والرطوبة السطحية في تعزيز درجات الملاءمة في المواقع التي تظهر فيها استجابة زراعية أو نباتية أفضل.

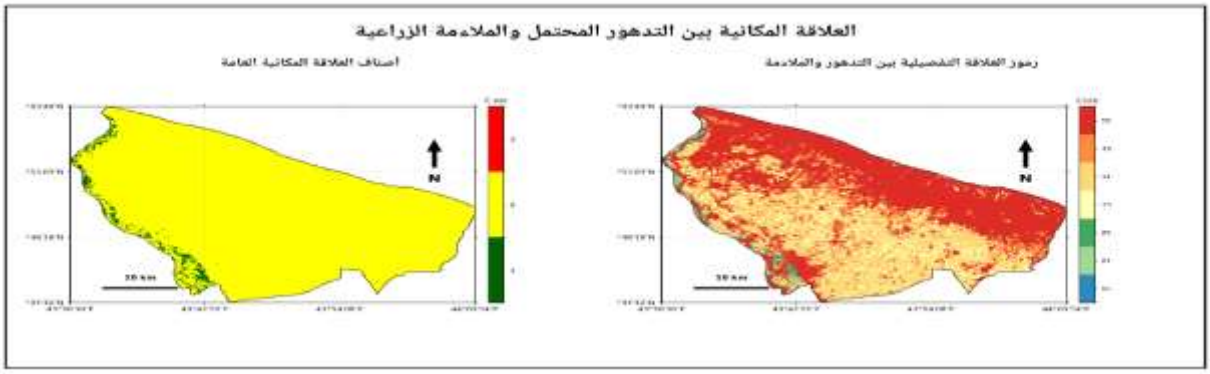
ومع ذلك، فإن ارتفاع الملاءمة الزراعية لا يعني غياب مخاطر التدهور المحتمل. فقد تظهر بعض الأراضي ضمن أصناف ملاءمة عالية أو عالية جداً، لكنها قد تكون في الوقت نفسه معرضة لضغوط تدهورية ناتجة عن انخفاض الكربون العضوي النسبي، أو انكشاف السطح، أو تذبذب الأمطار، أو تغير حالة الغطاء النباتي موسمياً. ولذلك لا ينبغي تفسير خريطة الملاءمة الزراعية بمعزل عن خريطة التدهور المحتمل، لأن العلاقة بين القابلية الزراعية والتدهور ليست علاقة عكسية مباشرة دائماً.

وعليه، فإن نتائج الملاءمة الزراعية المتكاملة تشير إلى أن منطقة الدراسة تمتلك إمكانات زراعية مكانية جيدة، لكنها تحتاج إلى إدارة مستدامة للتربة والمياه، وتحسين محتوى المادة العضوية، وتقليل الانكشاف السطحي، ومراعاة التذبذب المطري. كما تبقى هذه النتائج تقييماً رقمياً قائماً على المؤشرات المكانية، وليست بديلاً عن القياسات الحقلية والمختبرية المباشرة.

8.3. العلاقة المكانية بين التدهور والملاءمة

تهدف خريطة العلاقة المكانية بين التدهور المحتمل والملاءمة الزراعية إلى توضيح طبيعة التداخل المكاني بين مخرجي النموذج المتكامل، وهما خريطة التدهور المحتمل وخريطة الملاءمة الزراعية. ولا تمثل هذه الخريطة تكراراً للخرائط السابقة، بل تقدم قراءة تركيبية تساعد على تحديد المناطق التي تجمع بين القابلية الزراعية ودرجات الضغط التدهوري المحتمل. ويوضح الشكل (8) أصناف العلاقة المكانية العامة، فضلاً عن رموز العلاقة التفصيلية بين صنف التدهور وصنف الملاءمة داخل حدود قضاء العلم.

خريطة (6) العلاقة المكانية بين التدهور المحتمل والملاءمة الزراعية في قضاء العلم للمدة 2020–2025.



المصدر :مخرجات النموذج المتكامل ضمن بيئةGoogle Earth Engine .

جدول (6) أصناف العلاقة المكانية العامة بين التدهور المحتمل والملاءمة الزراعية

الصنف	التفسير	المساحة كم²	النسبة %
1	علاقة إيجابية: تدهور منخفض وملاءمة عالية	30.42	2.06
2	علاقة انتقالية/مختلطة	1448.69	97.94
3	علاقة حرجة	0	0
المجموع	—	1479.11	100

المصدر :إعداد الباحث بالاعتماد على مخرجات النموذج المتكامل ضمن بيئةGoogle Earth Engine .

جدول (7) مصفوفة العلاقة التفصيلية بين صنف التدهور وصنف الملاءمة

الرمز	التفسير	المساحة كم²	النسبة %
15	تدهور منخفض جداً + ملاءمة عالية جداً	1.96	0.13
24	تدهور منخفض + ملاءمة عالية	16.19	1.09
25	تدهور منخفض + ملاءمة عالية جداً	12.28	0.83
33	تدهور متوسط + ملاءمة متوسطة	182.55	12.34
34	تدهور متوسط + ملاءمة عالية	418.89	28.32
43	تدهور عالٍ + ملاءمة متوسطة	151.61	10.25
55	تدهور عالٍ جداً + ملاءمة عالية جداً	695.65	47.03

المصدر :إعداد الباحث بالاعتماد على مخرجات النموذج المتكامل ضمن بيئةGoogle Earth Engine .

توضح نتائج جدول (9) أن العلاقة الانتقالية أو المختلطة هي النمط المكاني السائد في منطقة الدراسة، إذ شغلت مساحة 1448.69كم²، وبنسبة 97.94%من إجمالي مساحة التحليل. أما العلاقة الإيجابية، التي تمثل

مناطق ذات تدهور محتمل منخفض وملاءمة زراعية عالية، فقد شغلت مساحة محدودة بلغت 30.42كم² وبنسبة 2.06%. ولم تسجل الخريطة أي مساحة ضمن صنف العلاقة الحرجة، لذلك أُدرج هذا الصنف في الجدول بقيمة صفرية للحفاظ على تطابق الجدول مع مفتاح الخريطة.

وتكشف مصفوفة العلاقة التفصيلية في جدول (10) أن الرمز 55 يمثل النمط الأوسع انتشاراً، إذ يشير إلى اجتماع التدهور المحتمل العالي جداً مع الملاءمة الزراعية العالية جداً، وقد بلغت مساحته 695.65كم² وبنسبة 47.03%. وهذه النتيجة لا تمثل تناقضاً بين خريطتي التدهور والملاءمة، بل تعني أن بعض الأراضي تمتلك قابلية زراعية رقمية مرتفعة، لكنها في الوقت نفسه تقع تحت ضغط تدهوري محتمل مرتفع.

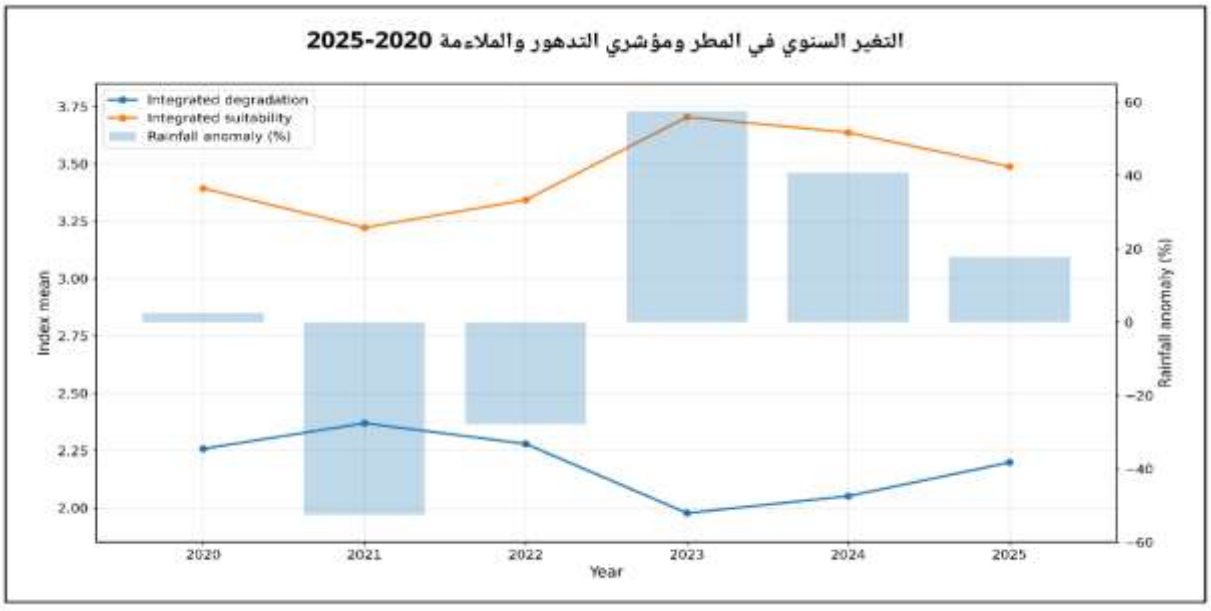
ويأتي الرمز 34 في المرتبة الثانية بمساحة 418.89كم² وبنسبة 28.32%، ويمثل مناطق تجمع بين تدهور محتمل متوسط وملاءمة زراعية عالية. كما شغل الرمز 33 مساحة 182.55كم² بنسبة 12.34%، وهو يعبر عن مناطق ذات تدهور محتمل متوسط وملاءمة متوسطة. أما الرمز 43 فقد مثل مناطق ذات تدهور محتمل عالٍ وملاءمة متوسطة، بمساحة 151.61كم² وبنسبة 10.25%.

وعليه، تؤكد خريطة العلاقة المكانية أن ارتفاع الملاءمة الزراعية لا يعني بالضرورة انخفاض التدهور المحتمل. فالكثير من الأراضي في قضاء العلم تمتلك قابلية زراعية جيدة أو عالية، لكنها تحتاج إلى إدارة وقائية مستمرة بسبب تعرضها لضغوط مرتبطة بانكشاف السطح، وضعف المادة العضوية، وتذبذب المطر، وتغير الغطاء النباتي موسمياً. لذلك فإن التفسير الإداري لهذه المناطق لا يتمثل في استبعادها من الزراعة، بل في إعطائها أولوية في إجراءات الحماية والتحسين، مثل رفع محتوى المادة العضوية، وتقليل الانكشاف السطحي، وتحسين إدارة الري والتربة.

8.4 التحليل السنوي والاتجاه الزمني

أظهرت الإحصاءات السنوية أن سنة 2021 كانت سنة الضغط الأعلى، إذ سجلت أدنى مطر موسمي بلغ 31.85 ملم، وشذوذ مطري سالب بلغ -52.49%، وتزامن ذلك مع أعلى متوسط للتدهور المتكامل وأدنى متوسط للملاءمة. وفي المقابل، سجلت سنة 2023 أفضل استجابة رقمية، إذ بلغ المطر الموسمي 105.85 ملم، وشذوذ المطر 57.46%، وانخفض متوسط التدهور وارتفع متوسط الملاءمة.

الشكل (1) التغير السنوي في المطر ومؤشري التدهور والملاءمة للمدة 2020–2025.



المصدر :إعداد الباحث بالاعتماد على جدول الإحصاءات السنوية ومخرجات النموذج المتكامل.

جدول (8) ملخص التحليل الزمني والاتجاهات

المحور	النتيجة الرئيسة
سنة الضغط الأعلى	2021، مطر موسمي 31.85 ملم، شذوذ -52.49%
أفضل سنة رقمياً	2023، مطر موسمي 105.85 ملم، شذوذ 57.46%
اتجاه التدهور حسب Sen’s slope	أغلب المنطقة دون اتجاه واضح، مع انخفاض التدهور في 23.98% وزيادته في 6.39%
اتجاه الملاءمة حسب Sen’s slope	أغلب المنطقة دون اتجاه واضح، مع تحسن الملاءمة في 28.06% وانخفاضها في 5.47%
Mann-Kendall عند 95%	غير دال إحصائياً في كامل منطقة التحليل

المصدر :إعداد الباحث بالاعتماد على جدول الإحصاءات السنوية ومخرجات النموذج المتكامل.

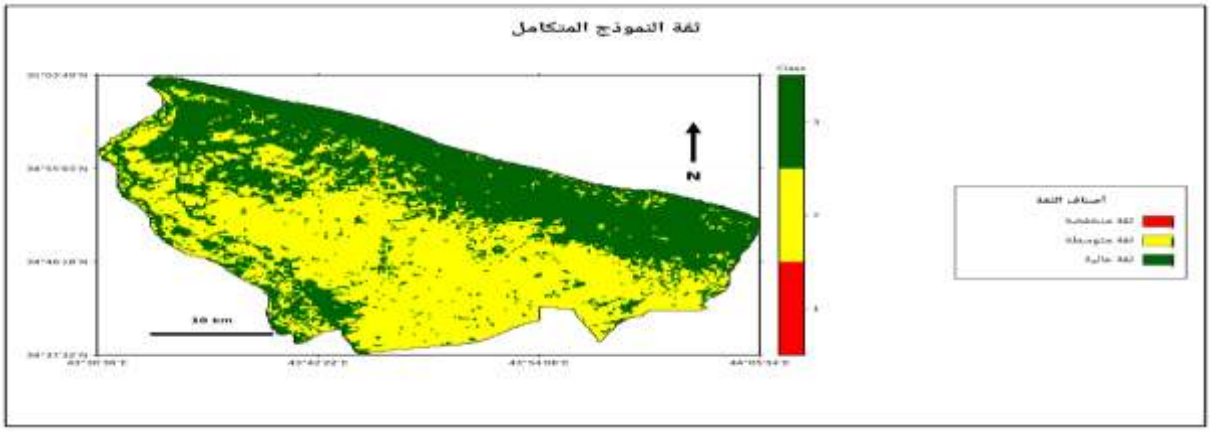
وتوضح نتائج Sen’s slope أن معظم منطقة الدراسة لم تظهر اتجاهاً واضحاً، سواء في التدهور أو الملاءمة. كما أظهرت خرائط Mann-Kendall أن 100% من منطقة التحليل غير دالة إحصائياً عند مستوى 95% لكل من التدهور والملاءمة. لذلك لا يصح الادعاء بوجود اتجاه زمني مؤكد خلال المدة 2020–2025، وينبغي التعامل مع الاتجاهات بوصفها مؤشرات وصفية أولية تحتاج إلى سلسلة زمنية أطول [18، 19].

8.5.الارتباطات، الحساسية، وثقة النموذج

دعمت نتائج الارتباط الاتساق الداخلي للنموذج، إذ ظهرت علاقة عكسية قوية جداً بين التدهور المتكامل والملاءمة المتكاملة، حيث بلغ Pearson -0.986 و Spearman -0.973. كما ارتبط التدهور سلبياً مع SOC واحتمالية المحاصيل و Sentinel-1 VH، بينما ارتبطت الملاءمة إيجابياً مع SOC و NDMI واحتمالية المحاصيل. وتشير هذه العلاقات إلى أهمية المادة العضوية، والرطوبة النسبية، والإشارة الزراعية والرادارية في تفسير التدهور والملاءمة.

أظهر تحليل الحساسية أن سيناريو المؤشرات الطيفية والرادارية الثقيلة أحدث فرقاً أكبر في الملاءمة مقارنة بسيناريو التربة الثقيل، مما يدل على حساسية الملاءمة لتغير أوزان مؤشرات الغطاء النباتي والرطوبة والإشارة الرادارية. كما أظهرت خريطة الثقة أن معظم منطقة التحليل تقع ضمن ثقة متوسطة وعالية، مع مساحة شبه معدومة للثقة المنخفضة.

خريطة (7) ثقة النموذج المتكامل.



المصدر:عمل الباحث بالاعتماد على مخرجات تحليل الحساسية وثقة النموذج المتكامل.

جدول (9) ملخص الارتباطات والحساسية وثقة النموذج

المحور	النتيجة
العلاقة بين التدهور والملاءمة	علاقة عكسية قوية جداً
أهم عوامل انخفاض التدهور	ارتفاع SOC، ارتفاع احتمالية المحاصيل، تحسن إشارة Sentinel-1 VH

أهم عوامل الملاءمة	SOC، NDMI، احتمالية المحاصيل
الحساسية	الملاءمة أكثر حساسية لسيناريو الطيفي/الراداري الثقيل
الثقة	معظم المنطقة ضمن ثقة متوسطة وعالية

المصدر :إعداد الباحث بالاعتماد على مخرجات تحليل الحساسية وثقة النموذج المتكامل.

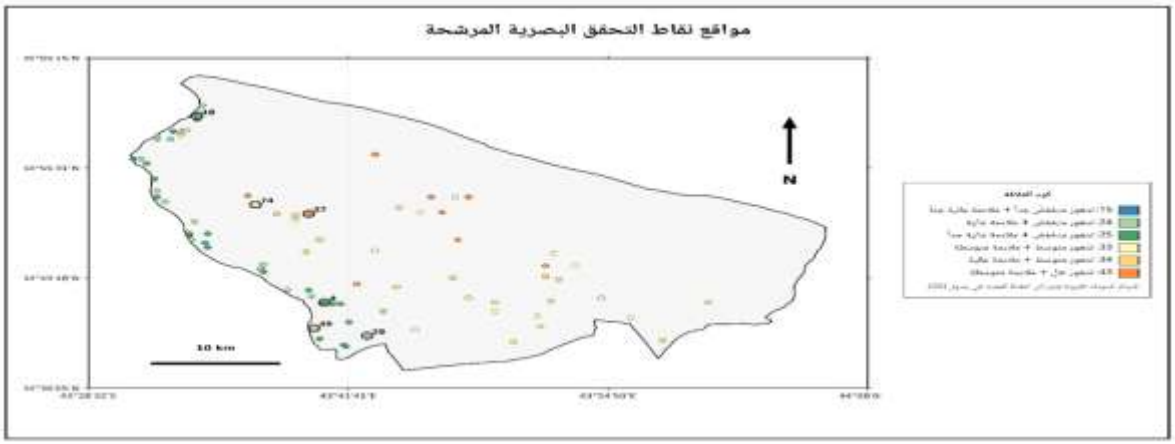
8.6.نقاط التحقق البصرية المرشحة

أنتج النموذج 80 نقطة تحقق بصرية مرشحة باستخدام أسلوب العينة الطبقية Stratified Sample، وبواقع 40 نقطة لكل صنف من صنفي العلاقة المكانية العامة بين التدهور المحتمل والملاءمة الزراعية. وتهدف هذه النقاط إلى توفير أساس أولي للفحص البصري اليدوي، وليس إلى تقديم تحقق حقلي أو مختبري مباشر.

تتضمن نقاط التحقق إحداثيات الموقع بنظام WGS84 ممثلة بخط الطول ودائرة العرض، فضلاً عن صنف التدهور المحتمل، وصنف الملاءمة الزراعية، ومؤشر التدهور، ومؤشر الملاءمة، وصنف الثقة، وبعض خصائص التربة الرقمية. كما يحتوي ملف النقاط على حقول مخصصة للتحقق اليدوي، وهي manual_label وmanual_confidence وnotes، ويجب ملء هذه الحقول بعد الفحص البصري باستخدام Google Earth أو مرئيات عالية الدقة قبل اعتماد النقاط كتحقق بصري فعلي.

يوضح الشكل (17) التوزيع المكاني لنقاط التحقق البصرية المرشحة داخل منطقة الدراسة. وقد رُمزت النقاط في الخريطة حسب كود العلاقة بين صنف التدهور وصنف الملاءمة، وتشمل الأكواد الظاهرة في ملف النقاط والخريطة15 :، 24، 25، 33، 34، 43 .كما تم تمييز النقاط الممثلة الواردة في جدول (20) بدوائر سوداء أكبر لتسهيل التعرف عليها مكانياً.

خريطة (8) مواقع نقاط التحقق البصرية المرشحة حسب كود العلاقة بين التدهور المحتمل والملاءمة الزراعية.



المصدر :إعداد الباحث بالاعتماد على مخرجات العينة الطبقية وإحداثيات نقاط التحقق ضمن بيئة Google Earth Engine.

جدول (10): نقاط تحقق بصرية ممثلة حسب أكواد العلاقة بين التدهور والملاءمة

رقم النقطة	خط الطول E	دائرة العرض N	كود العلاقة	صنف التدهور	صنف الملاءمة	مؤشر التدهور	مؤشر الملاءمة	الثقة
18	43.56717	35.00173	15	1	5	0.464	4.928	3
28	43.7109	34.67834	24	2	4	1.323	4.188	3
4	43.67497	34.72775	25	2	5	0.823	4.627	2
74	43.61658	34.87148	33	3	3	2.28	3.363	2
49	43.66598	34.68957	34	3	4	1.655	3.84	2
57	43.66149	34.858	43	4	3	2.423	3.26	2

المصدر :إعداد الباحث بالاعتماد على ملف نقاط التحقق البصرية المرشحة.

تُعد هذه النقاط مرحلة تحقق أولية، ولذلك لا ينبغي تفسيرها على أنها تحقق ميداني أو مختبري نهائي. فالتحقق الفعلي يتطلب فحص كل نقطة بصرياً، وتحديد طبيعة الغطاء الأرضي وحالة السطح ووجود مؤشرات زراعية أو مظاهر انكشاف أو تدهور، ثم تعبئة حقول manual_label وmanual_confidence وnotes. وبعد إكمال هذه الخطوة يمكن استخدام النقاط كمرجع بصري داعم لتقييم نتائج النموذج.

وبما أن الخريطة وملف النقاط الحاليين لا يتضمنان نقاطاً ممثلة للكود 55، فإن هذا الكود ينبغي أن يُعطى أولوية في مرحلة تحقق لاحقة، لأنه يمثل مواقع تجمع بين تدهور محتمل عالٍ جداً وملاءمة زراعية عالية جداً .وهذه المواقع مهمة إدارياً لأنها قد تمثل أراضي ذات قابلية زراعية مرتفعة لكنها معرضة لضغط تدهوري محتمل، ولذلك يفضّل إضافة نقاط تحقق بصرية أو حقلية ممثلة لها مستقبلاً لضمان تغطية جميع الأنماط المهمة في مصفوفة العلاقة.

المناقشة

تكشف نتائج البحث أن قضاء العلم لا يمكن وصفه بأنه متدهور بالكامل أو ملائم زراعياً بالكامل، بل تظهر فيه علاقة مكانية مركبة بين القابلية الزراعية والضغط التدهوري المحتمل. فقد أظهرت الخرائط وجود مساحات واسعة ذات ملاءمة عالية أو عالية جداً، لكنها تقع في الوقت نفسه ضمن مستويات مرتفعة من التدهور المحتمل. ويعني ذلك أن المشكلة ليست في غياب القابلية الزراعية، بل في تعرض هذه القابلية لضغوط قد تؤثر في استدامتها مستقبلاً.

تؤكد المقارنة بين نموذج Sentinel-2 الأساسي والنموذج المتكامل أن المؤشرات الطيفية وحدها غير كافية لتقييم التدهور في البيئات شبه الجافة، لأنها تتأثر بالموسمية والجفاف والحصاد وانكشاف التربة. وقد أسهم إدخال البيانات الرادارية، وخرائط التربة الرقمية، وشذوذ الأمطار، وقناع الأراضي الزراعية في تحسين تفسير النتائج وتقليل الاعتماد على إشارة طيفية واحدة.

تظهر أهمية الرمز 55 بوصفه النمط الإداري الأبرز في البحث، لأنه يجمع بين تدهور محتمل عالٍ جداً وملاءمة زراعية عالية جداً. وهذا النمط لا يمثل تناقضاً، بل يشير إلى أراضٍ ذات قيمة زراعية تحتاج إلى إدارة وقائية، خاصة من حيث تحسين المادة العضوية، وتقليل انكشاف السطح، وإدارة الرطوبة والري.

كما توضح النتائج الزمنية أن المطر عامل مهم في تفسير التغير السنوي، ولا سيما في سنة 2021 الجافة وسنة 2023 الرطبة نسبياً. ومع ذلك، فإن غياب الدلالة الإحصائية في اختبار Mann-Kendall يؤكد أن مدة ست سنوات غير كافية لإثبات اتجاه طويل الأمد. لذلك ينبغي التعامل مع نتائج الاتجاه بوصفها مؤشرات وصفية أولية، لا دليلاً زمنياً قاطعاً.

وبصورة عامة، يدعم تحليل الارتباط والحساسية موثوقية النموذج من حيث الاتساق الداخلي، لكنه لا يلغي الحاجة إلى تحقق حقلي ومختبري. فالنتائج تمثل تقييماً مكانياً رقمياً قائماً على المؤشرات، وينبغي تطويره مستقبلاً بإضافة عينات تربة وبيانات حقلية وسلسلة زمنية أطول.

الاستنتاجات

أظهر النموذج المتكامل قدرة أفضل من نموذج Sentinel-2 الأساسي في تقييم التدهور المحتمل والملاءمة الزراعية، لأنه دمج المؤشرات الطيفية والرادارية والتربوية والمطرية والطبوغرافية.

بلغت مساحة التدهور المحتمل العالي جداً 695.65 كم² بنسبة 47.03%، وهي أكبر فئة في خريطة التدهور المتكامل.

شغل صنف التدهور المتوسط 601.44 كم² بنسبة 40.66%، مما يدل على أن معظم منطقة التحليل تقع ضمن مستويات تدهور محتمل متوسطة إلى عالية جداً.

لم تظهر أصناف الملاءمة المنخفضة جداً أو المنخفضة ضمن النموذج المتكامل، إذ انحصرت النتائج في الملاءمة المتوسطة والعالية والعالية جداً.

بلغت مساحة الملاءمة العالية جداً 709.88 كم² بنسبة 47.99%، وبلغت نسبة الملاءمة العالية والعالية جداً معاً 77.40%.

أظهرت العلاقة المكانية أن 97.94% من منطقة التحليل تقع ضمن علاقة انتقالية أو مختلطة بين التدهور والملاءمة.

مثّل الرمز 55 النمط الإداري الأهم، لأنه يجمع بين تدهور محتمل عالٍ جداً وملاءمة زراعية عالية جداً، وشغل 695.65 كم² بنسبة 47.03%.

لم تظهر نتائج Mann-Kendall دلالة إحصائية عند مستوى 95%، لذلك لا يمكن تأكيد اتجاه زمني طويل الأمد خلال مدة الدراسة.

أوضحت الارتباطات أن SOC و NDMIواحتمالية المحاصيل و Sentinel-1 VHمن أهم المتغيرات الداعمة في تفسير التدهور والملاءمة.

تبقى النتائج تقييماً مكانياً رقمياً قائماً على المؤشرات، وليست بديلاً عن القياسات الحقلية والمختبرية المباشرة.

التوصيات

إعطاء الأولوية للتحقق الحقلي والمختبري في المناطق التي تجمع بين التدهور المحتمل العالي جداً والملاءمة الزراعية العالية جداً، ولا سيما المواقع الممثلة للرمز 55.

تحسين محتوى المادة العضوية في التربة من خلال إضافة المخلفات العضوية والسماد العضوي، وتقليل الممارسات التي تسرّع فقدان الكاربون العضوي.

تقليل انكشاف سطح التربة من خلال الزراعة المحافظة، وإدارة بقايا المحاصيل، وتشجيع الغطاء النباتي.

تحسين إدارة الرطوبة والري، خاصة في السنوات الجافة، لأن النتائج أظهرت دوراً واضحاً للمطر و NDMI في تفسير التدهور والملاءمة.

استخدام خريطة الملاءمة الزراعية بالتزامن مع خريطة التدهور وخريطة العلاقة المكانية، لأن ارتفاع الملاءمة لا يعني بالضرورة انخفاض مخاطر التدهور.

عدم تفسير مؤشر SI_Brightness بوصفه قياساً مختبرياً للملوحة أو بديلاً عنEC ، بل كمؤشر طيفي مساعد يحتاج إلى تحقق ميداني.

تحديث النموذج بإضافة سنوات لاحقة، لأن السلسلة الزمنية الأطول تجعل اختبارات Sen’s slope و Mann-Kendallأكثر قوة.

اعتماد عينات تربة مستقبلية تشمل EC و pHو SOCوالقوام و BDODو CECوالنتروجين ونسبة الرطوبة للتحقق من دقة النموذج.

استخدام نقاط التحقق البصرية المرشحة كبداية لاختيار مواقع الفحص البصري والزيارة الميدانية، مع ملء حقول التصنيف والثقة والملاحظات قبل اعتمادها.

اعتماد خرائط الثقة عند تفسير النتائج واتخاذ القرار، مع إعطاء الأولوية للمناطق ذات الثقة العالية والمتوسطة.

قائمة المصادر

[1] United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). Soil Degradation: Hazard Information Profile.

[2] FAO. 2017. *Voluntary Guidelines for Sustainable Soil Management*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

[3]الأمم المتحدة في العراق. 2025 .ثمار التغيير: مكافحة التصحر من خلال الزراعة الحافظة للإدارة المستدامة للأراضي في جنوب العراق .الأمم المتحدة في العراق.

[4]الجهاز المركزي للإحصاء/هيأة الإحصاء ونظم المعلومات الجغرافية، العراق. 2024 .الإحصاءات البيئية للعراق: المؤشرات الزراعية لسنة 2024 .بغداد: وزارة التخطيط.
[5]وزارة التخطيط العراقية .ورشة عمل عن مكافحة التصحر في العراق .بغداد: وزارة التخطيط.
[6]المركز العربي لدراسات المناطق الجافة والأراضي القاحلة .(ACSAD) دور أكساد في تحييد تدهور الأراضي/ورشة عمل.
[7] FAO. 1976. *A Framework for Land Evaluation*. FAO Soils Bulletin 32. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
[8] Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031
[9] Copernicus Data Space Ecosystem. Sentinel-2 Level-2A Surface Reflectance Documentation. European Union/Copernicus.
[10] Google Earth Engine Developers. Sentinel-1 Algorithms and GRD Preprocessing Documentation. Google Earth Engine Documentation.
[11] Brown, C. F., Brumby, S. P., Guzder-Williams, B., Birch, T., Brooks Hyde, S., Mazzariello, J., et al. 2022. Dynamic World, near real-time global 10 m land use land cover mapping. *Scientific Data*, 9, 251. DOI: 10.1038/s41597-022-01307-4
[12] Hengl, T., Mendes de Jesus, J., Heuvelink, G. B. M., Ruiperez Gonzalez, M., Kilibarda, M., Blagotić, A., et al. 2017. SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLOS ONE*, 12(2), e0169748. DOI: 10.1371/journal.pone.0169748
[13] Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., et al. 2015. The climate hazards infrared precipitation with stations—A new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2, 150066. DOI: 10.1038/sdata.2015.66
[14] USGS. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global DEM Documentation. U.S. Geological Survey.
[15] Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Third Earth Resources Technology Satellite Symposium*, NASA SP-351.
[16] Huete, A. R. 1988. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295–309. DOI: 10.1016/0034-4257(88)90106-X
[17] Gao, B. C. 1996. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257–266. DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3
[18] Mann, H. B. 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3), 245–259. DOI: 10.2307/1907187
[19] Sen, P. K. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389. DOI: 10.1080/01621459.1968.10480934