المجلد 01
العدد 01

نوفمبر
2026

الهيئة العربية
للاستثمار والإنماء الزراعي
ARAB AUTHORITY FOR
AGRICULTURAL INVESTMENT & DEVELOPMENT

مجلة
الاستثمار والأمن الغذائي المستدام

مجلة الهيئة العربية للاستثمار والإنماء الزراعي

مجلة علمية محكمة

الرقم الدولي المطبوع: 3080-2644
الرقم الدولي الإلكتروني: 3080-2652



https://doi.org/10.68363/jifs.01.01.47

تطبيقات الاستشعار عن بعد والطائرات غير المأهولة (الدرون) في مراقبة الحالة العامة لأشجار النخيل خصوصًا آفة سوسة النخيل

ناجي عبد العزيز أسد
المركز العربي لدراسات المناطق الجافة والأراضي القاحلة (أكساد)
الصبورة، دمشق، سورية

تاريخ الاستلام: 2026-02-23 تاريخ القبول: 2026-07-12

الملخص:

تواجه القطاعات الزراعية في الوطن العربي بوصفها من أعمدة الأمن الغذائي والتنمية تحديات متشابكة ناجمة عن الآفات والأمراض النباتية والتغيرات المناخية. تشير التقديرات الدولية إلى أن الآفات والأمراض النباتية تتسبب عالميًا بخسائر تصل إلى نحو 40% من إجمالي الإنتاج الزراعي بكلفة تُقدَّر بأكثر من 220 مليار دولار سنويًا للأمراض النباتية وحدها **(FAO, 2021)**. وتُعد آفة سوسة النخيل الحمراء *(Rhynchophorus ferrugineus)* من أخطر الآفات التي تهدد أشجار النخيل في الشرق الأوسط وشمال أفريقيا حيث تتجاوز خسائرها الاقتصادية 500 مليون دولار جراء موت آلاف الأشجار المنتجة للتمور. كما تعاني المنطقة العربية من تدهور أكثر من 26 مليون هكتار من الأراضي الزراعية بخسائر اقتصادية تتجاوز 9 مليارات دولار سنويًا **(UNCCD, 2022)** في ظل استهلاك القطاع الزراعي العربي لنحو 85% من الموارد المائية العذبة وبلوغ معدل التوتر المائي في الإقليم 440% مقارنة بمتوسط عالمي قدره 68% **(World Bank, 2020)**.

في هذا السياق تبرز أهمية تطبيقات الاستشعار عن بعد والطائرات بدون طيار (الدرون) كأدوات ابتكارية لتعزيز استدامة القطاع الزراعي من خلال رصد الحالة العامة للنبات بواسطة المؤشرات الطيفية مثل المؤشر النباتي للفرق الطبيعي (NDVI) ومؤشر الحافة الحمراء للفرق الطبيعي (NDRE)

- Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)
- Normalized Difference Red Edge Index (NDRE)

إضافة إلى تقنية الليدار (LiDAR) والتصوير الحراري بما يمكّن من الكشف المبكر عن الإصابات والاضطرابات الفسيولوجية قبل ظهور الأعراض المرئية.

اعتمدت هذه الدراسة المنهج الوصفي التحليلي الكمي القائم على معالجة معطياتSentinel-2 وبيانات الدرون لمنطقة الدراسة وحساب المؤشرات الطيفية والحرارية (NDVI, NDRE, PRI, LST) ومقارنتها بالأساليب التقليدية.

أظهرت النتائج تفوقًا واضحًا لتقنيات الاستشعار عن بعد والدرون في السرعة والشمولية والدقة والكشف المبكر بنسبة إصابة كلية بلغت 5.9% ونسبة إجهاد عام بلغت 8.3% في منطقة الدراسة مما يؤكد أن الاستثمار في هذه الحلول الذكية يمثل خطوة محورية نحو زراعة أكثر كفاءة واستدامة في البيئات القاحلة وشبه القاحلة التي تميّز معظم الدول العربية.

الكلمات المفتاحية:

(الاستشعار عن بعد، الطائرات بدون طيار (الدرون)، سوسة النخيل الحمراء، المؤشرات الطيفية، صحة النخيل)

المقدمة:

يُعد قطاع النخيل من أهم الموارد الزراعية والاقتصادية في الوطن العربي حيث تحتل الدول العربية الصدارة عالميًا في إنتاج التمور وتصديرها وتمتلك أكثر من 70% من إجمالي أشجار النخيل على مستوى العالم. وتكمن أهمية النخيل في دوره الحيوي في الأمن الغذائي وتوفير فرص العمل وتعزيز الاستقرار الاجتماعي في المناطق الريفية فضلًا عن رمزيته الثقافية والدينية. ورغم هذه الأهمية الاستراتيجية يواجه قطاع النخيل تحديات بيئية خطيرة أبرزها انتشار آفة سوسة النخيل الحمراء (*Rhynchophorus ferrugineus*) المعروفة بقدرتها التدميرية الصامتة إذ تصيب جذع النخلة داخليًا دون ظهور أعراض واضحة في المراحل الأولى مما يتسبب في خسائر اقتصادية فادحة تبلغ ملايين الدولارات سنويًا في دول مثل السعودية والإمارات ومصر إذا لم يتم الكشف عنها والتعامل معها مبكرًا.

تعتمد طرق الكشف التقليدية على الفحص البصري والفخاخ الفرمونية والتقنيات اليدوية وهي غالبًا غير فعالة في المراحل المبكرة من الإصابة. من هنا تبرز أهمية الابتكار التكنولوجي في حماية هذه الثروة الزراعية حيث يتجه البحث والتطوير نحو أنظمة إنذار مبكر تجمع بين دقة المستشعرات الأرضية وشمولية بيانات الاستشعار عن بعد والدرون **(Ellsäßer et al., 2020–2022)**. فقد أحدثت هذه التقنيات ثورة في مجال الزراعة وخاصة في مراقبة صحة المحاصيل على نطاق واسع لما توفره من بيانات طيفية وحرارية وهيكلية للأشجار باستخدام منصات متعددة كالأقمار الصناعية والطائرات بدون طيار (UAVs) والمستشعرات الأرضية المحمولة تُستخدم لرصد التغيرات الفيزيولوجية والبيوكيميائية في الأشجار المصابة مثل انخفاض محتوى الكلوروفيل وتغيرات درجة الحرارة السطحية واضطرابات البنية النسيجية مما يمنح المزارعين وقتًا ثمينًا لاتخاذ الإجراءات الوقائية والعلاجية.
(Ellsäßer et al., 2020–2022). وانطلاقًا من هذه المعطيات تسعى الدراسة الحالية إلى بناء إطار عمل متعدد المصادر لمراقبة أشجار النخيل والكشف المبكر عن آفة سوسة النخيل الحمراء على النحو المفصّل في أهداف البحث التالية.

أهداف البحث:

- تطوير إطار عمل للمراقبة المتعددة المصادر لأشجار النخيل باستخدام الصور الفضائية ومعطيات الدرون.
- استخراج مؤشرات ومعادلات طيفية لتحديد حالة الإجهاد للأشجار والمتغيرات الحرارية بهدف الكشف عن الإجهاد والآفات.
- تقييم قابلية استخدام الطائرات بدون طيار (الدرون) في إدارة سوسة النخيل الحمراء وتحديد المناطق عالية الخطورة.
- إنشاء خرائط لتوزيع أشجار النخيل المصابة بسوسة النخيل الحمراء وخرائط الإجهاد العام.

مراجعة الأدبيات:

تناولت دراسات عديدة أهمية استخدام الاستشعار عن بعد في مراقبة الغطاء النباتي من خلال المؤشرات الطيفية التي تساعد في الكشف عن التغيرات الفسيولوجية للنبات قبل ظهور الأعراض البصرية **(Paul et al., 2024)**.

أشارت أبحاث حديثة إلى إمكانية استخدام الطائرات بدون طيار المجهزة بكاميرات متعددة الأطياف (Multispectral) وحرارية (Thermal) في الكشف المبكر عن إصابة سوسة النخيل عبر ملاحظة تغيرات درجة حرارة جذع النخلة أو مؤشرات الإجهاد المائي والكلوروفيل ومعرفة الفروق في القيم الطيفية والحرارية بين النخيل المصاب والسليم قبل ظهور الأعراض البصرية **(Delalieux et al., 2023)**.

استُخدمت معطيات الليدار (LiDAR) لمعرفة البنية الثلاثية الأبعاد لتاج الشجرة (crown) وارتفاع النخلة وحجم كتلتها الخضرية بما يساعد في استخراج مؤشرات فيزيولوجية لا تظهر في الصور الطيفية وحدها **(Alsanea et al., 2022)**.

تجمع مراجعات وبحوث حديثة على أهمية الجمع بين تقنيات الاستشعار عن بعد وتطبيقات الدرون والمستشعرات الأرضية ونماذج الذكاء الاصطناعي وتعلم الآلة مستفيدة من التطور السريع في الشبكات العصبونية ونماذج حديثة مثل (ResNet, MobileNet, DenseNet) لتصنيف الصور الجوية والميدانية للكشف عن النخيل المصاب والتفريق بين مراحل الإصابة **Torky, M. &(others). (2023).**

وبناءً على ما تقدم من الدراسات السابقة تتضح الحاجة إلى إطار منهجي يدمج المعطيات الفضائية ومعطيات الدرون معًا للاستفادة من مزايا كل منهما وهو الإطار الذي صُممت وفقه منهجية الدراسة الحالية المفصّلة في القسم التالي:

المنهجية:

اعتمدت هذه الدراسة المنهج الوصفي التحليلي الكمّي (Quantitative Descriptive-Analytical Approach) القائم على معالجة وتحليل معطيات الاستشعار عن بعد والطائرات بدون طيار باستخدام المؤشرات الطيفية والحرارية ومقارنة نتائجها بالمسوحات الميدانية والأساليب التقليدية بهدف الكشف المبكر عن الإجهاد النباتي العام والإصابة بآفة سوسة النخيل الحمراء ورسم خرائط توزعها في منطقة الدراسة. وتتألف المنهجية من المراحل الأساسية التالية: (تحديد منطقة الدراسة، جمع المعطيات الفضائية ،جمع معطيات الدرون ميدانيًا
وأخيرًا حساب المؤشرات الطيفية والحرارية وتحليلها) كما يوضحها التفصيل التالي:

تحديد منطقة الدراسة

الجدول (1): الإحداثيات الجغرافية لمنطقة الدراسة

الزاوية	Latitude N	Longitude E
الزاوية العليا (شمال شرق)	N °34.539019	E °38.266904
الزاوية السفلى (جنوب غرب)	N °34.531526	E °38.247536

المساحة الكلية 150 هكتارًا، وعدد الأشجار التقريبي 58500 شجرة، ضمن منطقة زراعية تحتوي على بساتين نخيل ذات تربة رملية طينية، ومناخ صحراوي جاف، مع تعرّض محتمل للإجهاد الحراري والمائي وسوسة النخيل.



الشكل (1): صورة فضائية من القمر الصناعي **Sentinel-2A** توضح منطقة الدراسة وتظهر بساتين النخيل

المعطيات الاستشعارية الفضائية المستخدمة:

الاستشعار عن بعد:

هو عملية جمع المعلومات عن جسم أو ظاهرة دون الاتصال المادي المباشر بهدف الحصول على بيانات عن المحاصيل والأراضي الزراعية ومعرفة حالتها العامة .تُقدّم هذه التقنية مزايا هامة مقارنة بالأساليب التقليدية وتُمكّن من تحديد المتغيرات والتباين في الحالة العامة والإجهاد للغطاء النباتي **(Kazanskiy, 2025; Al-Mahmoud & van der Meer, 2023).**

البيانات الفضائية:

استخدام صور الأقمار الصناعية (Sentinel-2 للبيانات الطيفية وLandsat 8/9 للبيانات الطيفية والحرارية) لتغطية مساحات أوسع وتحليل الاتجاهات العامة والمتغيرات والإجهاد خصوصًا في حال عدم توفر الدرون **(Kazanskiy, 2025).**

البيانات الميدانية:

إجراء مسوحات ميدانية للتحقق من دقة البيانات المُجمّعة عن بعد تشمل الفحص البصري للأشجار وأخذ عينات من الأوراق أو الجذوع وتحديد الأشجار المصابة فعليًا بواسطة متخصصين.

معطيات الطائرات بدون طيار (الدرون) والقدرات التي تتميز بها: يسمح استخدام الطائرات بدون طيار المجهزة بكاميرات متعددة الأطياف وحرارية وصور (RGB) عالية الدقة بالمراقبة الدورية المنتظمة ورصد المتغيرات بمرور الوقت **(Paul et al., 2024)**. ومن أهم هذه التجهيزات:

الكاميرات متعددة الأطياف وفوق الطيفية (Multispectral & Hyperspectral Cameras): قادرة على التقاط بيانات من مجالات طيفية متعددة، تسمح بتحليل التغيرات في الانعكاس الطيفي للأوراق وهي مؤشر مبكر على الإجهاد المائي أو نقص المغذيات أو الإصابة بالآفات مثل سوسة النخيل الحمراء قبل ظهور علامات الاصفرار أو الذبول مرئيًا **(Al-Mahmoud & van der Meer, 2023).**

الكاميرات الحرارية (Thermal Cameras): تلتقط الإشعاع الحراري المنعكس من الأشجار وتحدد الاختلافات في درجة حرارة الأنسجة الناتجة عن الإجهاد أو الإصابة بالآفات حيث يؤدي نشاط اليرقات داخل جذع الشجرة إلى ارتفاع درجة الحرارة في المناطق المصابة **(Farhan et al., 2024).**

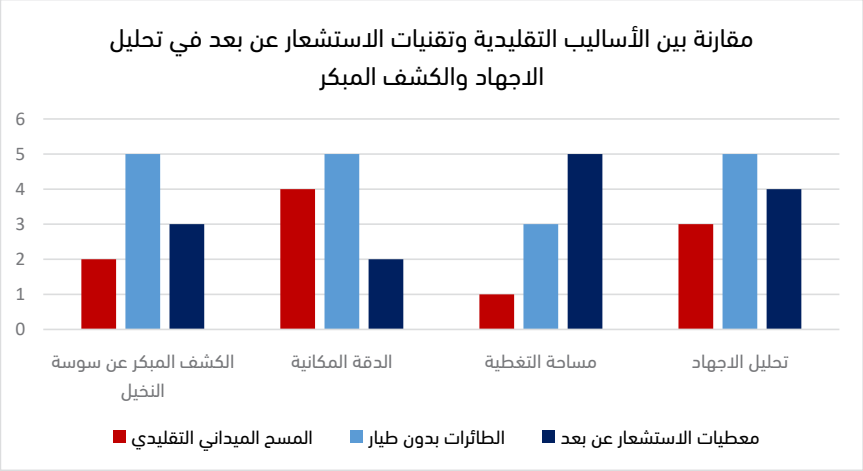
الصور الجوية عالية الدقة (High-Resolution RGB Cameras): تُستخدم لرسم خرائط دقيقة لأعداد الأشجار وكثافتها وتحديد مواقع الأشجار الفردية ورصد التغيرات الهيكلية في تيجان الأشجار وبناء نماذج ثلاثية الأبعاد لتقييم الأضرار **(Delalieux et al., 2023).**

معطيات الليدار (LiDAR): تستخدم أشعة الليزر لإنشاء نماذج ثلاثية الأبعاد دقيقة لهيكل الشجرة بما في ذلك ارتفاعها وحجم تاجها وكثافة أوراقها وهي بيانات حاسمة في تقدير الكتلة الحيوية وتقييم الصحة الهيكلية للنخيل كما يمكنها الكشف عن تشوهات بنية الشجرة الناجمة عن سوسة النخيل الحمراء حتى لو كانت الآفة غير مرئية على السطح **(Alsadik et al., 2024)**.

تتفوق تقنيات الاستشعار عن بعد والطائرات بدون طيار في الكشف المبكر عن إصابة سوسة النخيل الحمراء على الوسائل التقليدية من خلال عدة جوانب حيوية، كما يوضحها الجدول التالي والرسم البياني المصاحب له.

الجدول (2): تفوق تقنيات الاستشعار عن بعد والطائرات بدون طيار في الكشف المبكر عن الإصابة بآفة سوسة النخيل الحمراء

الجانب	الميزة	الأساليب التقليدية	تقنيات الاستشعار عن بعد والطائرات بدون طيار
الشمولية والسرعة	تغطية واسعة وفي وقت قصير	فحص يدوي بطيء، محدود بالعدد والمساحة، ويتطلب جهدًا بشريًا كبيرًا	مسح شامل وسريع خلال وقت قصير باستخدام صور عالية الدقة من طائرات مسيّرة أو أقمار صناعية
الكشف المبكر	الكشف في مراحل أولية جدًا	يعتمد على ظهور أعراض مرئية متأخرة أو أدوات صوتية للكشف عن اليرقات داخل الجذع	يكشف "إجهادًا نباتيًا" مبكرًا قبل ظهور الأعراض المرئية عبر تحليلات متعددة وفائقة الطيف
الدقة والموضوعية	نتائج موضوعية وقابلة للتكرار	عرضة للخطأ البشري، ويعتمد على خبرة الفاحص أو المزارع	يعتمد على بيانات رقمية وتحليلات كمية، يمكن دمجها مع الذكاء الاصطناعي لتحسين الدقة
التكلفة على المدى الطويل	كفاءة اقتصادية أفضل على المدى المتوسط والطويل	تكاليف تشغيلية مرتفعة بسبب الحاجة لفريق ميداني دائم	تكلفة أولية أعلى، تنخفض مع التكرار وتقلل الخسائر الاقتصادية عبر الكشف المبكر
إمكانية المراقبة المستمرة	مراقبة مستمرة وتحليل توجهات صحة النخيل	صعوبة تنفيذ مراقبة دورية منتظمة لمزارع كبيرة	إمكانية إجراء مراقبة دورية ومقارنة البيانات عبر الزمن لاكتشاف التغيرات الدقيقة



الرسم البياني (1): مقارنة بين الأساليب التقليدية وتقنيات الاستشعار عن بعد والدرون في تحليل الإجهاد والكشف المبكر ومساحة المراقبة

المصدر: بيانات الدراسة، بالاستناد إلى (Galieni & Ziv, 2021)

المؤشرات والمعادلات الطيفية المعتمدة في هذه الدراسة:

تعكس الأشجار السليمة كميات مميزة من الضوء في نطاقات طيفية معينة (خاصة في المجال الطيفي الأحمر القريب) وعند تعرضها للإجهاد يتغير نمط الانعكاس الطيفي حيث تلتقط المستشعرات هذه التغيرات قبل ظهور الأعراض المرئية مما يسمح بالتدخل المبكر وتحديد عدد من مسببات الإجهاد منها: **الإجهاد المائي (نقص الري)- نقص العناصر الغذائية- تلف ميكانيكي أو كيميائي- أو هجمات حشرية أو فطرية**. وتُعد المؤشرات الطيفية النباتية والحرارية معادلات رياضية تستخدم قيم الانعكاس الطيفي في عدة مجالات مختلفة لتقييم الحالة العامة للغطاء النباتي وحالة الإجهاد باستخدام معطيات (**Landsat-9, Sentinel-2**).

من أهم هذه المؤشرات:

المؤشر النباتي للفرق الطبيعي (NDVI): أشهر المؤشرات وأكثرها استخدامًا لتقييم كثافة الغطاء النباتي وصحة الأوراق. يعتمد على الفرق بين انعكاس الأشعة تحت الحمراء القريبة (NIR) والنطاق الأحمر (RED). يشير انخفاض قيمة NDVI غالبًا إلى إجهاد نباتي أو تدهور الصحة **(Qi et al., 1994).**

المؤشر النباتي المعزز (EVI): أقل حساسية لتأثيرات الغلاف الجوي والتربة ويعطي نتائج أفضل في المناطق ذات الغطاء النباتي الكثيف والسليم **(Qi et al., 1994).**

مؤشر الحافة الحمراء للفرق الطبيعي (NDRE): يستخدم نطاقات حافة المجال الطيفي الأحمر (Red Edge) والقريبة من الأشعة تحت الحمراء ويمتاز بحساسيته العالية للتغيرات الطفيفة في محتوى الكلوروفيل مما يجعله مثاليًا للكشف المبكر عن الإجهاد العام والإصابة بسوسة النخيل في مراحلها الأولى حتى قبل ظهور الأعراض المرئية بوضوح **(Paul et al., 2024)**.

المؤشرات الحرارية (Thermal Indices): تلعب دورًا حيويًا في تقييم صحة النبات حيث تعكس التغيرات في درجة حرارة سطح النبات الإجهاد المائي أو المرضي باستخدام المجال الطيفي الحراري في المعطيات الفضائية والكاميرات الحرارية المثبتة على الدرون **(El-Refaey & Omar, 2025)**.

الجدول (3): المعادلات الطيفية وأهميتها عند استخدام معطيات Sentinel-2

المؤشر	الأهمية	معادلة Sentinel-2	نقاط القوة	نقاط الضعف
NDVI	يقيس كثافة الغطاء النباتي وصحته بناءً على امتصاص الضوء الأحمر وانعكاس الأشعة تحت الحمراء القريبة	(NIR - Red) / (NIR + Red) NDVI= (B8 - B4)/(B8 + B4) • B8 = NIR (842 nm) • B4 = Red (665 nm)	سريع، شائع، مناسب للمراحل المبكرة	يتشبع في الكثافة العالية، لا يكشف الإجهاد الداخلي
NDRE	يقيس محتوى الكلوروفيل في الأوراق، خاصة في النباتات الناضجة أو ذات الأوراق السميكة	(NIR - RedEdge) / (NIR + RedEdge) NDRE = (B8 - B5)/(B8 + B5) • B5 = Red Edge (705 nm)	يكشف الإجهاد في التاج الداخلي، مناسب للمراحل المتقدمة	أقل دقة في المراحل المبكرة
PRI	يعكس كفاءة التمثيل الضوئي والإجهاد الضوئي أو المائي قبل ظهور أعراض مرئية	PRI approx. (B3 - B4)/(B3 + B4) • B3 = Green (560 nm)	حساس جدًا للإجهاد المبكر	يتأثر بالضوء والزاوية
EVI	يحسّن دقة NDVI في المناطق ذات الكتلة الحيوية العالية أو الضباب الجوي	EVI = 2.5 *(B8 - B4)/(B8 + 6 *B4 - 7.5 * B2 + 1) • B2 = Blue (490 nm)	أكثر حساسية من NDVI	يتطلب وجود مجال طيفي Red Edge

المصدر: (Montero et al., 2023)

تحليل المؤشرات الطيفية والحرارية :

تم حساب مؤشرات (NDVI, NDRE, PRI, LST) لكل شجرة أو مجموعة أشجار ورسم خرائط وتحليل الفروقات والتباين الحراري لتحديد المناطق المجهدة ومواقع البؤر المصابة باستخدام برامج نظم المعلومات الجغرافية (GIS) وبرامج تحليل المعطيات الفضائية **(Paul et al., 2024)**.

آلية ومراحل العمل للكشف المبكر والمراقبة:

المسح الأولي من خلال جمع الصور الفضائية المتعددة الطيفية والحرارية (**Landsat**-9, **Sentinel-**) وتطبيق المعالجة المسبقة (تصحيح هندسي وإشعاعي) وتحليل المعطيات ومراقبة المنطقة المدروسة.

حساب المؤشرات الطيفية (NDVI, NDRE, EVI) والمؤشر الحراري (LST) بهدف تحديد المناطق التي تظهر عليها علامات الإجهاد العام وتحليل المؤشرات وتحديد الإجهاد والبؤر الساخنة وترتيب أولويات المراقبة ورسم خرائط صحية للنخيل.

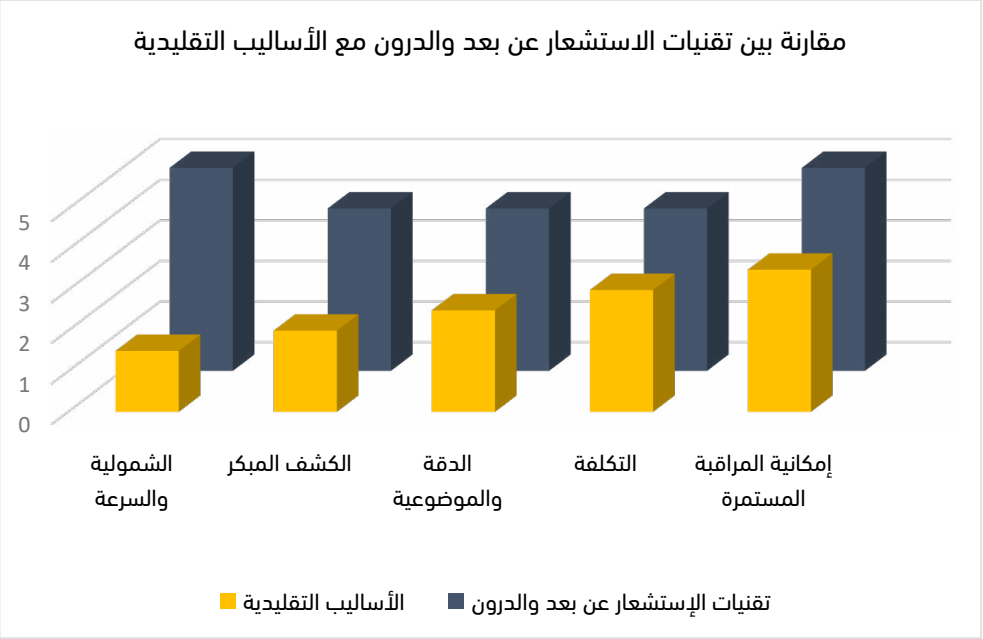
إجراء مسوحات دورية جوية للمناطق ذات الأولوية باستخدام طائرات بدون طيار مجهزة بكاميرات عالية الطيفية وحرارية وصور جوية عالية الدقة المكانية وتكرار هذه الرحلات خلال فترة النشاط العالي للآفة وحساب المؤشرات وتحديد الفروقات الحرارية والتمايز الطيفي لكل شجرة.

التحقق الميداني وتتبع الأشجار المصابة وهي مرحلة حاسمة للتحقق من صحة النتائج المستخلصة من معطيات الاستشعار عن بعد والدرون باستخدام أجهزة استشعار صوتية للكشف عن نشاط اليرقات الأولي وبداية الإصابة.
التدخل والمعالجة بعد التأكد من النتائج وتحديد الأشجار المصابة حيث تختلف إجراءات المعالجة حسب درجة الإصابة (الحقن بالمبيدات المناسبة، العزل، قطع الأشجار المصابة ،وتطبيق إجراءات وقائية للأشجار السليمة).

التقييم والمتابعة بعد المعالجة حيث تستمر المراقبة الدورية بواسطة الدرون بهدف تقييم فعالية التدخل ومتابعة أي عدوى جديدة.

النتائج:

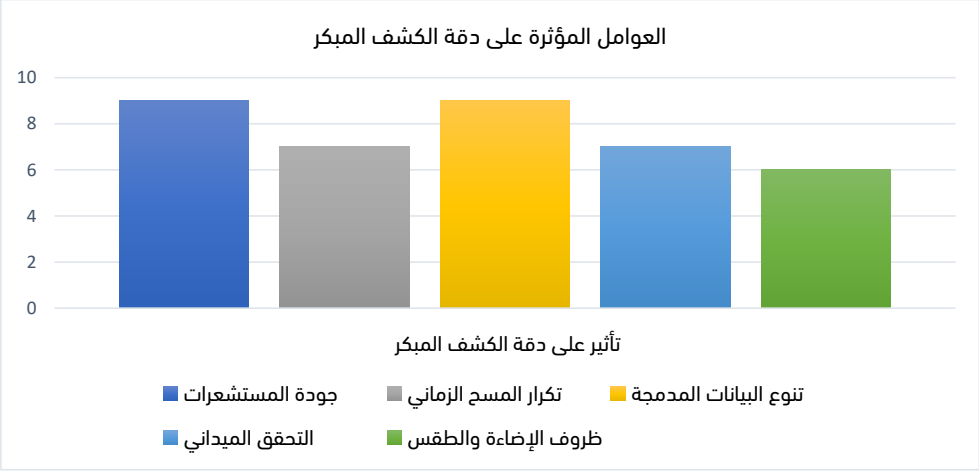
الرسوم البيانية وجداول المقارنات حول المنهجية المتبعة



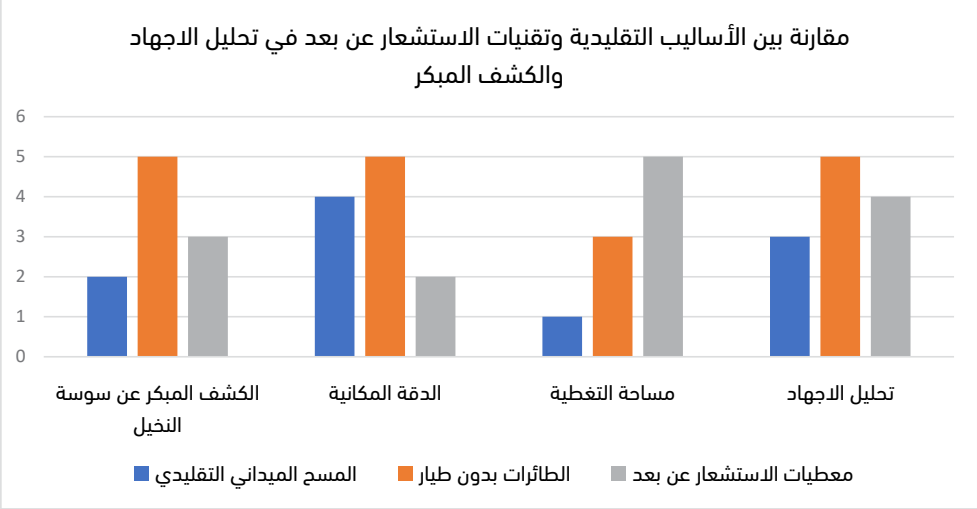
الرسم البياني (2): الدمج بين صور الأقمار الصناعية والدرون يساهم في تحسين دقة الكشف بشكل ملحوظ

المصدر: (Yildiz et al., 2025)

تتعزز كفاءة الكشف عن سوسة النخيل من خلال فهم العلاقة بين التقنيات المستخدمة وعدد من العوامل المؤثرة، منها جودة المستشعرات، وتنوع البيانات المستخدمة، وتكرار المسح الميداني، والظروف المناخية (Mendel et al., 2023).



الرسم البياني (3): العوامل المؤثرة في تحديد دقة الكشف المبكر عن الإصابة

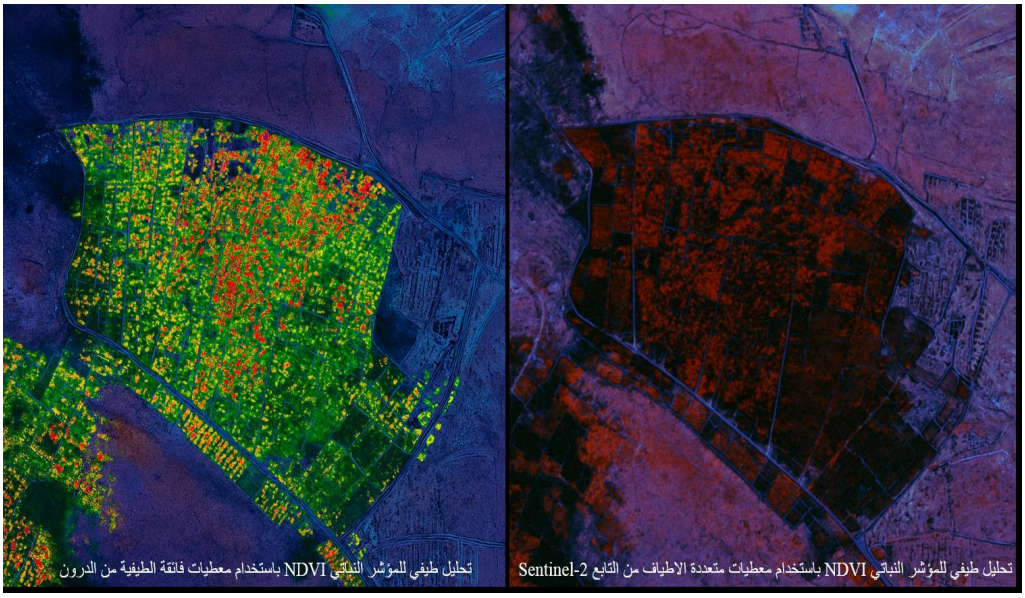


الرسم البياني (4): مقارنة بين الأساليب التقليدية وتقنيات الاستشعار عن بعد في تحليل الإجهاد والكشف المبكر

المصدر: (El-Refaey & Omar, 2025)

لوحظ تحسّن ملحوظ في تحديد حالة الإجهاد العام وتحديد مناطق الإصابة عند تحليل مؤشر NDVI من المعطيات الناتجة عن الدرون مقارنة مع تحليل المؤشر نفسه باستخدام معطيات Sentinel-2.

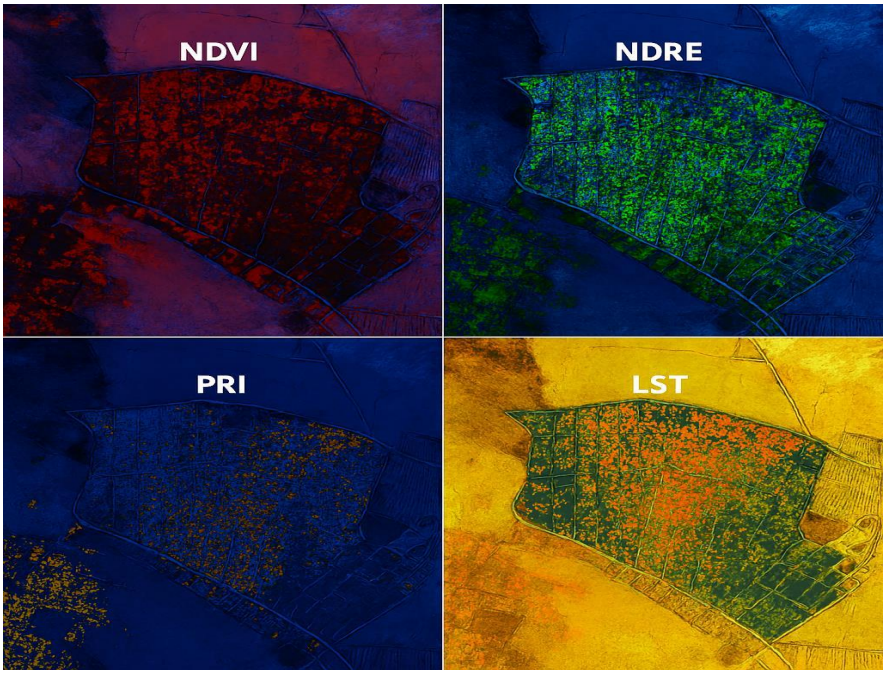
الشكل (2): تحليل طيفي للمؤشر (NDVI) باستخدام معطيات متعددة الأطياف (يمين) ومعطيات فائقة الطيفية من الدرون (يسار)



أظهرت النتائج أن المؤشرات الطيفية (NDVI, NDRE, PRI) وتكاملها مع المؤشر الحراري (LST) قادرة على التمييز بين النخيل السليم والمصاب قبل ظهور الأعراض البصرية حيث تم الحصول على هذه النتائج بناءً على تحليل المؤشرات وفق العتبات الطيفية والحرارية الموضحة في الجدول التالي.

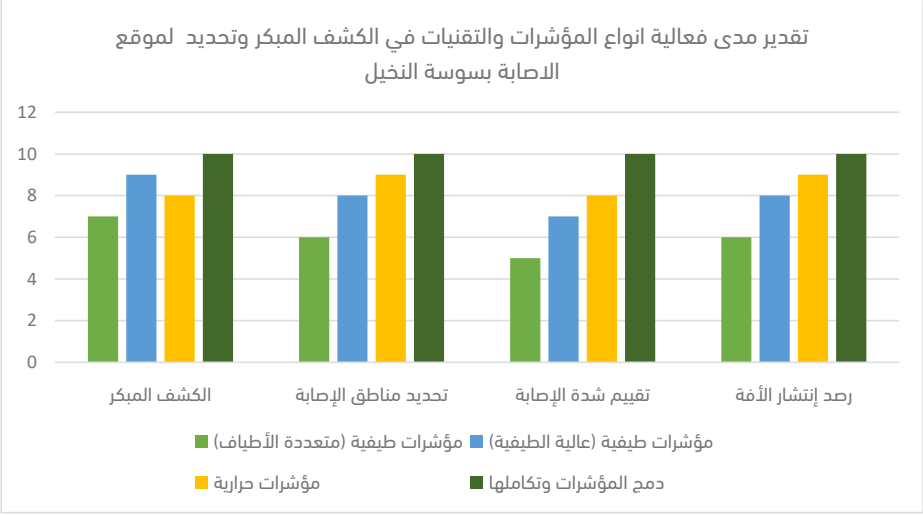
الجدول (4): عتبات المؤشرات الطيفية والحرارية المستخدمة في رسم خرائط الإجهاد والإصابة

المؤشر	سليم	مجهد	مشتبه	مصاب
NDVI	> 0.65	0.45–0.65	0.30–0.45	< 0.30
NDRE	> 0.40	0.25–0.40	0.15–0.25	< 0.15
PRI	> 0.05	-0.05–0.05	-0.10–-0.05	< -0.10
LST (°C)	< 32	32–35	35–37	> 37



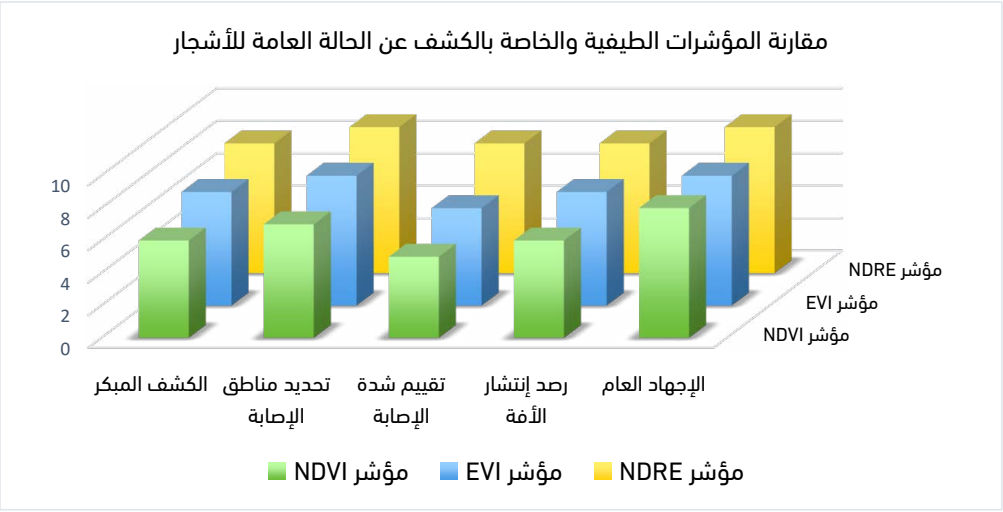
الشكل (3): المؤشرات الطيفية والحرارية (NDVI, NDRE, PRI, LST) المستخدمة في منطقة الدراسة

توضح هذه المؤشرات مدى فعالية أنواع المؤشرات والتقنيات في الكشف المبكر وتحديد موقع الإصابة بسوسة النخيل وأهمية دمج هذه المؤشرات وتكاملها **(Delalieux et al., 2023).**



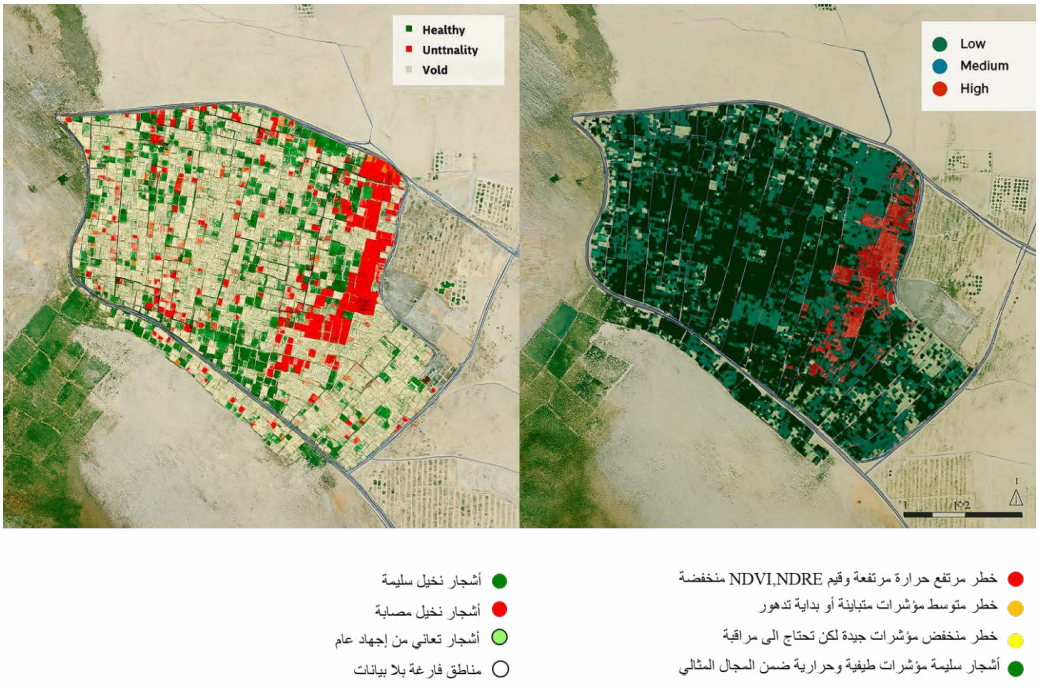
الرسم البياني (5): تقدير مدى فعالية أنواع المؤشرات والتقنيات في الكشف المبكر وتحديد موقع الإصابة بسوسة النخيل

من خلال تطبيق المؤشرات الطيفية النباتية، تبين أن مؤشر NDRE يتمايز عن بقية المؤشرات في دقة الكشف عن الإجهاد والإصابة ورصد انتشار الإصابة **(Rehman et al., 2022).**



الرسم البياني (6): مقارنة المؤشرات الطيفية الخاصة بالكشف عن الحالة العامة للأشجار (NDVI, EVI, NDRE)

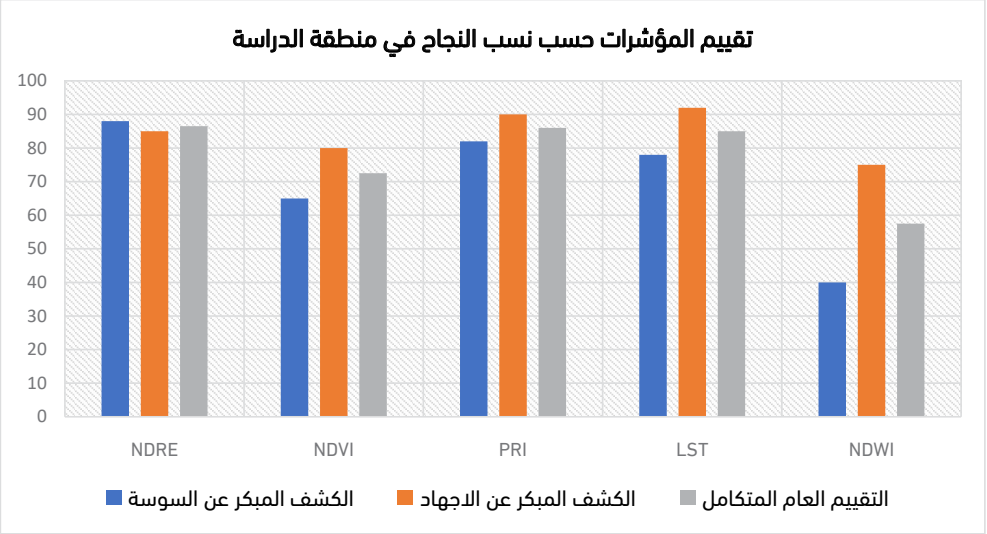
أظهرت نتائج تحليل المؤشرات الطيفية والحرارية القدرة على تحديد بؤر الإصابة والحصول على خرائط توضح درجات الخطورة كما يبينها الشكل التالي.



الشكل (4): خرائط توضح درجات المخاطر والإصابة في منطقة الدراسة

الجدول (5): تقييم المؤشرات حسب نسبة النجاح

المؤشر	نسبة النجاح فى الكشف عن السوسة	نسبة النجاح فى كشف الإجهاد العام	التقييم العام	ملاحظات
NDRE	88%	85%	86.5%	يكشف تغيرات الكلوروفيل في التاج الداخلي، حساس جدًا
PRI	82%	90%	86%	يكشف الإجهاد الفسيولوجي قبل ظهور الأعراض البصرية
LST	78%	92%	85%	يكشف الإجهاد الحراري ومناطق الإصابة المحتملة
NDVI	65%	80%	72.5%	جيد للمراقبة العامة، لكنه يتشبع في الكثافة العالية
NDWI	40%	75%	57.5%	مفيد للجفاف، لكنه غير حساس للإصابة المبكرة



الرسم البياني (7): تقييم المؤشرات حسب نسب النجاح في منطقة الدراسة

تقرير النتائج والإصابة في منطقة الدراسة

للكشف المبكر عن سوسة النخيل من المفيد استخدام المؤشرات**(NDRE + PRI + LST)** كمجموعة أساسية مع معطيات الدرون (فائقة الطيفية، حرارية، RGB عالي الدقة) وفق المتغيرات التالية:

- انخفاض مؤشر NDRE يشير إلى انخفاض محتوى اليخضور وضعف النشاط التمثيلي.
- ارتفاع مؤشر PRI يرتبط بتحديد مستوى وكفاءة عملية التمثيل الضوئي ويرتبط باستجابة النبات للإجهاد العام.
- ارتفاع مؤشر حرارة سطح النبات (LST) يعكس المتغيرات الحرارية الناتجة عن انخفاض التبخر والنتح وهو مؤشر إضافي يساعد في تحديد الإجهاد.

وبالنتيجة فإن تزامن هذه المتغيرات يُعد مؤشرًا هامًا لتحديد بدء الإصابة أو الإجهاد النباتي مما يتطلب اتخاذ إجراءات وقائية ضرورية لحماية الأشجار والتحقق الحقلي من الحالة في المنطقة المحددة.

لمراقبة الإجهاد النباتي العام من المهم الاستفادة من المؤشرات الطيفية والحرارية التالية:

(PRI + LST + NDVI) حيث توفر تغطية فسيولوجية وقراءة للمتغيرات الحرارية والتبدلات على الحالة العامة للأشجار من خلال تكامل ودمج تلك المؤشرات.

نسبة الإصابة الكلية في منطقة الدراسة: 5.9% | نسبة الإجهاد العام: 8.3%

المناقشة:

تشير هذه النتائج إلى فعالية تقنيات الاستشعار عن بعد والدرون في مراقبة الحالة العامة للأشجار والكشف عن الإجهاد والإصابة بآفة سوسة النخيل، مما يساهم في تقليل الخسائر الاقتصادية وتوفير الوقت والجهد. وتُعد هذه التقنيات ثورة حقيقية في مجال مراقبة صحة أشجار النخيل ومكافحة آفة سوسة النخيل الحمراء، حيث أصبح من الممكن الآن مراقبة بساتين وأشجار النخيل بدقة والكشف عن الإصابات في مراحلها المبكرة. وهذه القدرة على الكشف المبكر ليست مجرد تحسين تقني بل استراتيجية حاسمة لتقليل الخسائر الاقتصادية الفادحة وحماية الأمن الغذائي والحفاظ على الموروث الثقافي والبيئي لأشجار النخيل.

تحليل الحالة والمناقشة العامة

- أظهرت الخريطة الأولية أن المناطق الشرقية والجنوبية الشرقية من الواحة تحتوي على أعلى تركيز من الأشجار المصابة وهو ما يتوافق مع مؤشرات NDVI وNDRE ومؤشر درجة الحرارة LST. **El-Refaey, M., & Omar, S. (2025).**
- أظهرت المناطق الغربية والشمالية الغربية مؤشرات طيفية جيدة مما يدل على حالة نباتية مستقرة نسبيًا.
- صُنّفت المناطق إلى ثلاث درجات خطورة (مرتفعة- متوسطة- منخفضة) بناءً على المؤشرات الطيفية والحرارية.
- تمثل المؤشرات الطيفية أدوات دقيقة لرصد الحالة الفسيولوجية للنبات دون تدخل مباشر.
- تفيد المؤشرات الطيفية في تصنيف الأشجار حسب درجة الإصابة وتحديد المناطق التي تحتاج إلى تدخل عاجل.
- يُعد ارتفاع حرارة السطح مؤشرًا مباشرًا للإجهاد الحراري خاصة في البيئات الجافة مثل تدمر.
- تم دمج LST مع المؤشرات الطيفية لتحديد المناطق التي تعاني من إجهاد مزدوج فسيولوجي وحراري.
- يمثل دمج تقنيات الاستشعار عن بعد والطائرات بدون طيار نهجًا تحويليًا في مكافحة آفة سوسة النخيل الحمراء والحفاظ على ثروة النخيل من خلال توفير قدرات غير مسبوقة للكشف المبكر والمراقبة الدقيقة **(Wang & Zhang, 2025).**

الصور الفضائية (Sentinel-2)

- توفر تغطية دورية واسعة النطاق بدقة تصل إلى 10 أمتار مما يسمح برصد التغيرات الزمنية في صحة الأشجار.
- ساعدت الصور الخام في بناء قاعدة بيانات مكانية دقيقة وربطها بالمؤشرات الطيفية والحرارية.

- استُخدمت لتصميم خرائط التوزع وخرائط الخطورة والنماذج التنبؤية.

تقنيات ومعطيات الدرون

- مكّنت الدرون من جمع بيانات عالية الدقة على مستوى كل نخلة خاصة في المناطق التي يصعب الوصول إليها.
- استُخدمت كاميرات طيفية وحرارية محمولة على الدرون لرصد مؤشرات NDVI وLST ميدانيًا.
- ساهمت في التحقق من صحة النتائج المستخرجة من الصور الفضائية وتحديث قاعدة البيانات الميدانية.
- تقدم تقنيات الاستشعار عن بعد والطائرات بدون طيار مع جميع الملحقات والتجهيزات المتطورة حلولًا مبتكرة وفعالة لمراقبة صحة أشجار النخيل والكشف المبكر عن سوسة النخيل الحمراء **(Boulila et al., 2023).**

التحديات والقيود العملية

- **حجم البيانات الكبير:** الصور الفضائية والدرون تنتج كميات ضخمة من البيانات تتطلب تخزينًا ومعالجة عالية الأداء.
- **تكلفة التشغيل والصيانة:** ارتفاع التكلفة الأولية لشراء الدرون والملحقات والبرمجيات الخاصة بتحليل هذه المعطيات يتطلب استثمارات كبيرة ومع ذلك تُعد مجدية اقتصاديًا على المدى الطويل مقارنة بالخسائر الناجمة عن الآفة.
- **تفاوت جودة الصور:** الغيوم والزاوية الشمسية والتداخل الطيفي قد تؤثر على دقة المؤشرات المستخرجة.
- **تأخر التحديث الزمني:** بعض الأقمار الصناعية توفر صورًا كل 5–10 أيام مما يحد من الرصد الفوري.
- **تعدد المنصات:** اختلاف تنسيقات البيانات بين Sentinel وLandsat وغيرها يتطلب خبرة في التوحيد والمعالجة.
- **صعوبة الدمج الزمني والمكاني:** توحيد بيانات من مصادر مختلفة (فضائية -جوية) يتطلب نماذج متقدمة لضمان الاتساق.
- **القيود التنظيمية:** تشغيل الدرون يتطلب تصاريح خاصة في العديد من الدول وقد يُمنع في المناطق الحساسة.
- **الاعتماد على الظروف الجوية:** الرياح والأمطار والحرارة تؤثر على أداء الدرون وجودة الصور.
- **محدودية التغطية:** تغطي الدرون مساحات محدودة مقارنة بالأقمار الصناعية مما يتطلب تخطيطًا دقيقًا للرحلات.
- **الحاجة إلى معايرة دقيقة:** تتأثر مؤشرات مثل NDVI وLST بنوع المستشعر وزاوية الالتقاط وظروف السطح.

- **تداخل العوامل المؤثرة:** قد ينتج الإجهاد النباتي عن عوامل متعددة (ماء- حرارة- آفات) مما يصعّب تفسير المؤشرات منفردة.
- **نقص الكفاءات المتخصصة:** يتطلب تحليل البيانات الطيفية والحرارية خبرة في الاستشعار عن بعد والذكاء الاصطناعي ونظم المعلومات الجغرافية.
- **ضعف البنية التحتية الرقمية:** في بعض المناطق يعيق غياب الحوسبة السحابية أو الإنترنت عالي السرعة تحليل البيانات الضخمة.
- **الاعتماد على التمويل الخارجي:** تعتمد كثير من المشاريع على منح مؤقتة مما يهدد استمرارية الرصد طويل الأمد.

رغم أن هذه التقنيات تمثل ثورة في مراقبة صحة النباتات وإدارة الموارد الزراعية إلا أن الاستفادة الكاملة منها تتطلب بنية تحتية رقمية قوية وكفاءات بشرية مدربة ونماذج تحليلية متقدمة وتنسيقًا مؤسسيًا وتنظيميًا فعالًا.

الاستنتاجات:

- **الاستشعار عن بعد يوفر أدوات غير تدميرية دقيقة:** تتيح المؤشرات الطيفية (NDVI-NDRE) تقييم الحالة الفسيولوجية للنباتات دون الحاجة إلى تدخل مباشر مما يقلل من التكاليف ويزيد من سرعة الرصد.
- **الصور الفضائية تعزز الرؤية الشاملة عبر الزمن والمكان:** توفر الأقمار الصناعية (Landsat, Sentinel-2) تغطية دورية واسعة النطاق مما يسمح بتحليل التغيرات الموسمية ومراقبة مناطق يصعب الوصول إليها ميدانيًا.
- **توفر الدرون معطيات وصورًا بدقة مكانية عالية:** تتيح الطائرات المسيّرة جمع بيانات طيفية وحرارية على مستوى الشجرة الواحدة مما يعزز دقة التصنيف والتحقق الميداني.
- **دمج المؤشرات الطيفية والحرارية يزيد من دقة التشخيص:** الجمع بين مؤشرات الغطاء النباتي ودرجة حرارة السطح يسمح بتحديد نوع الإجهاد (مائي- حراري- بيولوجي) بشكل أكثر موثوقية.
- **إمكانية تصميم نماذج تنبؤية تدعم التخطيط الاستباقي:** يمكّن تحليل التغيرات الزمنية في المؤشرات من توقع تطور الإصابة أو الإجهاد، مما يساعد في توجيه التدخلات قبل تفاقم المشكلة.

التوصيات بهدف تعزيز الاستفادة من هذه التقنيات

- تطوير منصات مفتوحة المصدر لتحليل البيانات الطيفية والحرارية لتسهيل الوصول إلى الأدوات التحليلية خاصة في الدول النامية أو المناطق ذات البنية التحتية المحدودة.
- دمج البيانات متعددة المصادر في نظم دعم القرار الزراعي عبر واجهات تفاعلية تربط بين الصور الفضائية وبيانات الدرون والملاحظات الأرضية لتوجيه التدخلات بدقة.
- تعزيز التدريب وبناء القدرات لدى الفرق الزراعية والبيئية من خلال برامج تدريبية متخصصة في نظم المعلومات الجغرافية وتحليل المؤشرات وتشغيل الدرون.
- تشجيع البحث التطبيقي متعدد التخصصات، يجمع بين علوم الزراعة والبيئة والذكاء الاصطناعي والاستشعار عن بعد لتطوير حلول متكاملة ومستدامة.
- دعم السياسات الوطنية لتبني الزراعة الذكية عبر إدماج هذه التقنيات في خطط مكافحة التصحر وإدارة المياه ومراقبة الآفات وربطها بمؤشرات الأداء البيئي.
- الاستثمار في تطوير الكفاءات البشرية القادرة على استخدام هذه التقنيات وتحليل البيانات بوصفه حجر الزاوية في بناء مستقبل مستدام لزراعة النخيل.
- بناء منظومة تقييم متكاملة تجمع بين الرصد الفضائي والتحليل الميداني توفر أساسًا علميًا لاتخاذ قرارات دقيقة في إدارة صحة النخيل ومكافحة الإجهاد البيئي.
- تأسيس وحدة تنسيق محلية تشرف على جمع البيانات وتحليلها وتوجيه التدخلات بناءً على النماذج التنبؤية لضمان الاستفادة الكاملة من هذه التقنيات.

المراجع:

Alsadik, B., Ellsäßer, F. J., Awawdeh, M., Al-Rawabdeh, A., Almahasneh, L., Oude Elberink, S., ... & Al Asmar, Y. (2024). Remote sensing technologies using UAVs for pest and disease monitoring: A review centered on date palm trees. Remote sensing, 16(23), 4371.

Alsanea, M., Habib, S., Khan, N. F., Alsharekh, M. F., Islam, M., & Khan, S. (2022). A deep-learning model for real-time red palm weevil detection and localization. Journal of Imaging, 8(6), 170.

Boulila, W., Alzahem, A., Koubaa, A., Benjdira, B., & Ammar, A. (2023). Early detection of red palm weevil infestations using deep learning classification of acoustic signals. arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.15829

Delalieux, S., Hardy, T., Ferry, M., Gomez, S., Kooistra, L., Culman, M., & Tits, L. (2023). Red palm weevil detection in date palm using temporal UAV imagery. Remote Sensing, 15(5), 1380. https://doi.org/10.3390/rs15051380

El-Gayar, M., & El-Sayed, A. (2019). Detection of palm tree pests using thermal imaging: A review. In Smart applications and data analysis (pp. 215–230). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-02357-7_12

El-Refaey, M., & Omar, S. (2025). Deep learning-based spectral-thermal models for red palm weevil detection under arid conditions. Computers and Electronics in Agriculture, 225, 109934.

FAO. (2021). The state of food and agriculture 2021: Making agrifood systems more resilient to shocks and stresses. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FAO/AQUASTAT. (2023). Water scarcity indicators in the Near East and North Africa. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Farhan, S. M., et al. (2024). A comprehensive review of LiDAR applications in crop and agricultural monitoring. Sensors, 24(16), 5409. https://doi.org/10.3390/s24165409

Galieni, A., & Ziv, G. (2021). Past and future of plant stress detection: An overview. Frontiers in Plant Science, 11, 609155. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.609155

Hammami, Z., Krizhanovsky, E., Elbattay, A., & Singh, R. K. (2024). Study on the effectiveness of different control techniques for RPW and monitoring devices. ICBA/Biosaline.

Kagan, D., Fuhrmann Alpert, G., & Fire, M. (2021). Automatic large-scale detection of red palm weevil infestation using aerial and street view images. Computers and Electronics in Agriculture. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.10.004

Kazanskiy, N. (2025). A comprehensive review of remote sensing and artificial intelligence applications. Sensors, 25(19), 5965. https://doi.org/10.3390/s25195965

Le, T. S., Harper, R., & Dell, B. (2023). Application of remote sensing in detecting and monitoring water stress in forests. Remote Sensing, 15(13), 3360. https://doi.org/10.3390/rs15133360

Mendel, Z., et al. (2023). Seismic sensor-based management of the red palm weevil in commercial date palm plantations. Pest Management Science, 79(10), 4562–4571. https://doi.org/10.1002/ps.7836

Montero, D., et al. (2023). A standardized catalogue of spectral indices to advance Earth system research. Scientific Data, 10(1), 1–15. https://doi.org/10.1038/s41597-023-02096-0

Paul, S., Getahun, M., & Barbedo, J. G. A. (2024). Evaluation of UAV-based RGB and multispectral vegetation indices for precision agriculture. ISPRS Archives, 48-G-2025, 163–172. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-G-2025-163-2025

Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A. R., Kerr, Y. H., & Sorooshian, S. (1994). A modified soil adjusted vegetation index. Remote Sensing of Environment, 48(2), 119–126. https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90134-1

Rehman, T. H., Lundy, M. E., & Linquist, B. A. (2022). Comparative sensitivity of vegetation indices measured via proximal and aerial sensors for assessing nitrogen status and predicting grain yield in rice cropping systems. Remote Sensing, 14(12), 2770. https://doi.org/10.3390/rs14122770

Torky, M., & other authors. (2023). Recognizing sounds of red palm weevils (RPW) based on deep learning methods. Computers and Electronics in Agriculture. https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108079

UNCCD. (2022). Global land outlook—Regional reports: Middle East and North Africa. United Nations Convention to Combat Desertification.

Wang, L., & Zhang, H. (2025). Thermal and multispectral data fusion from UAV and Sentinel-2 for early stress detection in date palms. Remote Sensing of Environment, 320, 115892.

World Bank. (2020). Water in the Arab World: Management perspectives and innovations. World Bank Group.

Yildiz, V., et al. (2025). Comparison and accuracy assessment of unmanned aerial vehicle (UAV)-based remote sensing in agriculture. Sensors, 25(4), 1087. https://doi.org/10.3390/s25041087

Zarco-Tejada, P. J., Hubbard, N., & Loudjani, P. (2014). Precision agriculture: An opportunity for EU farmers. Joint Research Centre, European Commission. https://doi.org/10.2791/3266319

Remote sensing and drone applications for monitoring the general condition of palm trees, especially the red palm weevil

Naji Abdul Aziz Asaad
Arab Center for the Studies of Arid and Dry Zones (ACSAD)
Sabboura – Damascus – Syria

Received Date: 23-02-2026 Accepted Date: 12-07-2026

Abstract:

Agriculture in the Arab world ,a pillar of food security and rural livelihoods, faces interlinked challenges from plant pests, diseases, and climate change. Plant pests and diseases cause losses of approximately 40% of global agricultural production, costing more than $220 billion annually for plant diseases alone **(FAO, 2021)**.

The red palm weevil (Rhynchophorus ferrugineus) alone has caused losses exceeding $500 million in the Middle East and North Africa. The region also suffers degradation of more than 26 million hectares of agricultural land, with losses exceeding $9 billion annually **(UNCCD, 2022)**, while the Arab agricultural sector consumes about 85% of freshwater resources amid a regional water-stress level of 440% versus a global average of 68% **(World Bank, 2020).**

In this context, the importance of remote sensing applications and drones as innovative tools to enhance the sustainability of the agricultural sector is highlighted, through monitoring the general condition of plants using spectral indicators such as the Natural Difference Vegetation Index (NDVI) and the Natural Difference Red Edge Index (NDRE).

- Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)
- Normalized Difference Red Edge Index (NDRE)

In addition to LiDAR technology and thermal imaging which enables the early detection of injuries and physiological disorders before visible symptoms appear.

This study adopted a quantitative descriptive-analytical approach based on **Sentinel-2** imagery and **UAV** data for a study area, computing spectral and thermal indices (NDVI, NDRE, PRI, LST) and benchmarking them against conventional field methods.

Results showed a clear advantage of remote sensing and drones in speed, coverage, accuracy, and early detection, with a total infestation rate of 5.9% and a general stress

rate of 8.3% in the study area. Investing in these smart solutions is therefore a pivotal step toward more efficient and sustainable agriculture in the arid and semi-arid environments that characterize most Arab countries.

Keywords:

Remote Sensing, UAV/Drone, Red Palm Weevil, Spectral Indices, Palm Health.