Horizon Scanning as a Strategic Approach for Sustainable and Precision Forest Management: Towards Smart Forests in Syria

Dr. Maher Dayyoub*

(Received 17 / 2 / 2026. Accepted 7 / 6 /2026)

□ ABSTRACT □

This study aims to explore the vital role of Horizon Scanning (HS) as an advanced foresight tool to ensure resilience in sustainable forest management under accelerating climate challenges by leveraging technological advancements. The research analyzed Landsat and Sentinel-2 time-series data via Google Earth Engine (GEE) for the Fronloq Reserve in Latakia (2010–2026) to monitor "weak signals" of degradation and "emerging signals" of recovery.

Results demonstrated the effectiveness of (HS) in transforming spectral data into quantitative indicators, the Normalized Difference Vegetation Index NDVI analysis revealed that 7.19% of the reserve suffers from severe degradation (weak signals) requiring immediate intervention, while 22.95% showed significant natural recovery (positive emerging signals). A SWOT analysis (Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats) was conducted to assess the feasibility of adopting this approach in Syria, highlighting strengths such as expert personnel and existing institutional frameworks, alongside opportunities to bridge digital and economic gaps through free, open-source technologies

The study proposes a framework for transitioning toward precision and agile management, leading to the "Smart Forests 2050" vision in Syria to balance biodiversity conservation with sustainable development.

Keywords: Horizon Scanning, Sustainable Forest Management, Precision Forestry, Weak Signals, Smart Forests.

Copyright **:**Latakia University journal (formerly Tishreen) -Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

* **PhD- Researcher- Directorate of Agriculture- Latakia – Syria** maher.lat@gmail.com

المسح الأفقي كنهج استراتيجي للإدارة المستدامة والدقيقة للغابات نحو غابات ذكية في سورية

د. ماهر ديّوب*

(تاريخ الإيداع 17 / 2 / 2026. قبل للنشر في 7 / 6 / 2026)

□ ملخّص □

تهدف الدراسة إلى استكشاف الدور الحيوي للمسح الأفقي كأداة استشرافية متقدمة لضمان المرونة في الإدارة المستدامة الغابات ومواجهة التحديات المناخية المتسارعة بالاستفادة من التطور التقني.

اعتمد البحث على تحليل السلاسل الزمنية لبيانات الأقمار الصناعية (Landsat، Sentinel-2) عبر منصة Google Earth Engine (GEE) لموقع محمية الفرنلق بمحافظة اللاذقية، بهدف رصد "الإشارات الضعيفة" للتدهور البيئي و"الإشارات الناشئة" للتعافي خلال الفترة (2010-2026).

أظهرت النتائج قدرة المسح الأفقي على تحويل البيانات الطيفية إلى مؤشرات كمية دقيقة، حيث كشف مؤشر التغير الزمني لاختلاف الغطاء النباتي (ΔNDVI) أن 7.19% من مساحة المحمية تعاني من تدهور حاد يستلزم تدخلاً فورياً (إشارات ضعيفة)، بينما أظهرت 22.95% من المساحة تعافياً طبيعياً ملحوظاً (إشارات ناشئة إيجابية)، كما تم تنفيذ تحليل "نقاط القوة والضعف والفرص والتهديدات" لتقييم جدوى تبنّي هذا النهج في سورية، مبرزاً نقاط القوة المتمثلة في الكوادر الخبيرة والإطار المؤسسي، والفرص الكامنة في استخدام التقنيات المجانية مفتوحة المصدر لتقليص الفجوة الرقمية والاقتصادية.

تقترح الدراسة إطار عمل للتحول نحو الإدارة الدقيقة والرشيقة للغابات، وصولاً لتحقيق مفهوم "الغابات الذكية 2050" في سورية، كخيار استراتيجي طويل الأمد يضمن التوازن بين صون التنوع الحيوي ومتطلبات التنمية المستدامة.

الكلمات المفتاحية: المسح الأفقي، الإدارة المستدامة للغابات، الإدارة الدقيقة، الإشارات الضعيفة، الغابات الذكية.

حقوق النشر : مجلة جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)- سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص CC BY-NC-SA 04

* **دكتوراه- باحث- مديرية الزراعة- اللاذقية – سوريا.** maher.lat@gmail.com

مقدمة:

يُعرَّف المسح الأفقي على أنه عملية منهجية ومنظمة تهدف إلى تحديد، جمع، وتحليل الإشارات المبكرة للتغيرات الناشئة التي قد تؤثر على مستقبل الغابات والأراضي الحراجية [1]، وهو يدمج منهجيات الاستشراف الاستراتيجي التي تكشف وتحلّل منهجياً معلومات المستقبل، مع التركيز بشكل خاص على "الإشارات الضعيفة للتغيير Weak Signals" التي قد تمرّ دون ملاحظة في الأنظمة التقليدية للمراقبة والتقييم، هذه الإشارات عبارة عن مؤشرات أولية غامضة أو غير مكتملة لتغييرات محتملة، قد تبدو غير ذات أهمية في الوقت الراهن ولكنها قد تتطور لتصبح اتجاهات رئيسة أو أحداث جذرية [2]. إن القدرة على اكتشاف وتفسير هذه الإشارات مبكراً هي ما يميّز المؤسسات الاستشرافية عن المؤسسات التفاعلية.

لا تقتصر هذه المنهجية على رصد الابتكارات التقنية فقط، بل تشمل التحولات الاجتماعية والاقتصادية والسياسية والبيئية التي تُشكّل البيئة التشغيلية المعقدة لمديري الحراج وصناع السياسات، كما أنها تتجاوز التنبؤ التقليدي لتصبح أداة لبناء القدرة المؤسسية على التكيف والمرونة الاستراتيجية، وقد أبرزت دراسات حديثة دوره المتنامي في صون التنوع الحيوي وإدارة النظم البيئية، مؤكدةً أهميته في استباق مخاطر النظم البيئية Systemic Risks التي تتجلى في ثلاثة أبعاد رئيسة: الانتشار Spillover والانهيار الشامل للنظام البيئي System-wide collapse والترابط Interconnectedness بين العوامل المختلفة مثل الآفات، الجفاف، الحرائق، وتغير المناخ، و بيّنت مدى أهمية المسح الأفقي في فهم التحديات البيئية المعاصرة وإدارة الغابات على نحو استباقي [3–5].

يشكل التخطيط طويل الأجل تحدياً جوهرياً في إدارة الغابات، نظراً لطول دورات نمو الأشجار التي قد تمتد لعقود، وتفاقم تأثيرات التغير المناخي وتزايد الضغوط البشرية، والطلب المتنامي على خدمات النظام البيئي [6]. في هذا السياق المتغير بسرعة، لم يعد الاكتفاء بالتحليل الإحصائي التقليدي للبيانات القديمة كافياً لاتخاذ قرارات استراتيجية سليمة، مما يؤكد الحاجة الملحة إلى تبنّي أدوات استشرافية متقدمة مثل المسح الأفقي لدى صنّاع القرار في قطاع الغابات، بما يمكّنهم من التعرف المبكر على التهديدات والمخاطر الناشئة قبل أن تصبح أزمات حتمية، كما أشارت دراسات استشرافية مرتبطة بالمناخ على ضرورة استخدام هذه المنهجيات في الإدارة التكيفية للغابات [7–8].

على الصعيد العالمي، أصبح المسح الأفقي (HS) أداةً أساسية في مجال الغابات، إذ يدعم أطراً منهجية متنوعة ويظهر دوره كركيزة محورية في الإدارة التكيفية للغابات [9]، من خلال مراقبة مرونة النظام البيئي [6]، والتحول نحو اقتصاديات الكربون، وتحديد الاستراتيجيات الإدارية التي تعزّز التنوع الحيوي [10]، وفي هذا السياق، تبرز الإدارة الدقيقة للغابات Precision Forestry كأداة تطبيقية لهذه الاستراتيجيات، حيث تُعد أحد الاتجاهات الحديثة في الممارسات الحراجية، فهي تعتمد على دمج تقنيات الاستشعار عن بعد والنظم الذكية لتعزيز الإدارة المستدامة، ويأتي هذا التوجه متوافقاً مع مفهوم الغابات 4.0 (Forestry 4.0)، الذي يُعرّفه Keyser وآخرون [11] كمنظومة متكاملة لرقمنة العمليات الحراجية تهدف إلى تحويل البيانات الطيفية الضخمة إلى قرارات إدارية دقيقة تدعم استدامة النظم البيئية، وتتفق هذه المنهجيات مع التوجهات الإقليمية التي تتبناها المنظمة العربية للتنمية الزراعية (AOAD) [12]، والتي تؤكد في تقريرها لعام 2023 على ضرورة تبني الابتكار الرقمي وتقنيات الرصد الفضائي كركيزة أساسية لحماية النظم البيئية الغابوية في المنطقة العربية من المخاطر المناخية المتزايدة.

إن دور الاستشعار عن بعد في هذا المجال يتنامى بشكل ملحوظ، إذ يرى باحثون [13] أن دمج هذه التقنيات أصبح ضرورياً لتمكين الإدارة الدقيقة، وتؤكد الدراسات الحديثة أن التطورات في تقنيات الاستشعار عن بعد، بما في

ذلك استخدام الطائرات المسيّرة Drones، نُظم LIDAR، والذكاء الاصطناعي، قد أحدثت نقلة نوعية في إدارة الغابات الذكية [14]، إذ تتيح هذه الأدوات مراقبة دقيقة للتغيرات البيئية، تحسين عمليات التخطيط، وإدارة الموارد الحراجية، بما يعزّز القدرة على مواجهة تحديات مثل الحرائق، القطع الجائر، وتدهور التنوع الحيوي، وهو ما يشير إليه الباحثون بضرورة تزويد الجيل القادم من المسؤولين عن حماية الغابات بالمهارات اللازمة لتحليل هذه البيانات الضخمة [15] بالاستفادة من التقنيات المتقدمة.

أهمية البحث وأهدافه:

تُعد الغابات في سورية مثالاً حيوياً يوضح الضرورة الملحة لتبني منهجية "المسح الأفقي، حيث تتفاقم التحديات التقليدية المتمثلة في التعديات على الأراضي الحراجية، والضغط السكاني على أطراف الغابات، والاستغلال المفرط للحطب، بالتزامن مع التصاعد غير المسبوق في وتيرة الحرائق الكبرى في المنطقة الساحلية، إذ تشير الدراسات إلى أن التغيرات المناخية تزيد من قابلية الغابات المتوسطية للاشتعال [16]. في ظل تزايد خسارة الغابات نتيجة هذه التعديات، وعدم جدوى الحلول الإدارية التقليدية أو العلاجية خلال السنوات السابقة، تبرز أهمية هذه الدراسة من خلال استكشاف تطبيقات المسح الأفقي في إدارة الغابات السورية، بما يعزّز القدرة المؤسسية على مواجهة التحديات المناخية والبيئية المتسارعة. انطلاقاً من التحديات المذكورة، يسعى هذا البحث إلى تحقيق الأهداف المنهجية التالية:

1. تحليل دور المسح الأفقي كأداة استشرافية متقدمة في الكشف عن الإشارات الضعيفة التي تؤثر على مستقبل النظم البيئية للغابات المتوسطية في محمية الفرنلق كمثال تطبيقي قابل للتعميم على الغابات الساحلية في سورية، من خلال دمج التقنيات المجانية للاستشعار عن بعد والذكاء الاصطناعي في بناء نظام إنذار مبكر قادر على تحديد المناطق المتدهورة ذات الأولوية بالتدخل.
2. تنفيذ تحليل SWOT شامل لتقييم نقاط القوة والضعف والفرص والتهديدات المتعلقة بتبنّي نهج المسح الأفقي في سياق الإدارة الحراجية في سورية، لتحديد مدى جدوى تنفيذه عملياً.
3. اقتراح إطار عمل متكامل للمسح الأفقي في الغابات السورية لتسهيل التحول نحو "الغابات الذكية" في سورية كخيار استراتيجي طويل الأمد.

طرائق البحث ومواده:

اعتمدت الدراسة على مراجعة الأطر المنهجية العالمية للمسح الأفقي، أبرزها نظام المسح الأمريكي [1]، والمسح البريطاني [6]، والتجربة الفنلندية في المسح التفاعلي للاقتصاد الحيوي للغابات [17].

1- موقع الدراسة: تم تطبيق منهجية المسح الأفقي على موقع محمية الفرنلق في الريف الشمالي لمحافظة اللاذقية على بُعد 50 كم شمال مدينة اللاذقية (N: 35.847414° - E: 36.006133°) بمساحة 5367.82 هكتار (6.3 % من غابات محافظة اللاذقية)، وذلك لما تتميز به المحمية من تنوع حيوي فريد ونظام بيئي غابوي أوجي [18]، مما يجعلها موقعاً مثالياً لرصد التغيرات والاضطرابات البيئية التي حصلت خلال السنوات الماضية.

2- مصادر البيانات ومنصة المعالجة: اعتمدت الدراسة على معالجة البيانات المستمدة من السلاسل الزمنية للقمر الصناعي Landsat 7 المجموعة (LANDSAT/LE07/C02/T1_L2) بدقة مكانية 30م، والقمر الصناعي Sentinel-2 المجموعة (COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED) بدقة مكانية 10م، وذلك بتحليل

الصور الفضائية التي تقل فيها نسبة تغطية الغيوم عن 10%، مع الإشارة إلى أن بعض الآثار الطيفية البسيطة قد تبقى في بعض الصور وهو أمر شائع في بيانات الاستشعار عن بعد، ومن ثم إنتاج الصورة المركّبة (Composite) باستخدام قيمة الوسيط (Median) بهدف الحد من التشويش الطيفي وتحسين جودة التمثيل الإشعاعي للغطاء النباتي، وقد نُفّذت جميع عمليات المعالجة عبر المنصة السحابية Google Earth Engine (GEE)، التي تُعد من الأدوات مفتوحة المصدر لمعالجة البيانات الجيومكانية الضخمة، وهي أداة أثبتت كفاءة عالية في تحليل تغيرات الغطاء النباتي على نطاق واسع [19]، دون الحاجة إلى بنية تحتية حاسوبية محلية كبيرة، مما يجعلها مناسبة للتطبيق في سياقات محدودة الموارد كالحالة السورية، حيث تم مقارنة الحالة الراهنة للغطاء النباتي حتى الربع الأول من عام 2026 مع سنة الأساس 2010، ممّا أتاح رصد الإشارات البيئية وتحويلها إلى بيانات كمية قابلة للقياس بعيداً عن التقديرات الوصفية العامة، وتقديم قراءة تحليلية دقيقة وموضوعية للواقع الحالي من حيث التدهور والتعافي البيئي في محمية الفرنلق.

3- حساب مؤشر اختلاف الغطاء النباتي (Normalized Difference Vegetation Index - NDVI): يُعدّ مؤشر NDVI الأداة الأكثر شيوعاً وموثوقية في تقييم حيوية الغطاء النباتي وتتبع تغيراته عبر الزمن، وتبرز أهميته بشكلٍ خاص في دراسات استعادة النظم البيئية المتضررة من الحرائق، حيث تم استخدامه بما ينسجم مع التوجهات الحديثة لتقييم مرونة الغطاء النباتي Vegetation Resilience كما طرحها Huang وآخرون [20]، إضافة إلى منهجيات تقييم التعافي الحراجي Forest Recovery بعد الحرائق باستخدام السلاسل الزمنية لبيانات الأقمار الصناعية المتعددة المصادر كما ناقشها Wang وآخرون [21]، ونظراً لمحدودية توفر بيانات المعايرة الأرضية في المنطقة، فقد اعتمدت الدراسة على التحليل الطيفي المستند إلى بيانات الأقمار الصناعية حصراً، باعتباره الخيار الأكثر ملاءمة لظروف الدراسة.

يتم استخلاص قيم المؤشر رياضياً بناءً على التباين في انعكاس الأطوال الموجية، وفق المعادلة التالية:

$$\mathbf{NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)}$$

حيث تشير NIR (Near-Infrared) إلى الانعكاس في نطاق الأشعة تحت الحمراء القريبة، Red: إلى الانعكاس في نطاق الضوء الأحمر المرئي، تم حساب المؤشر برمجياً باستخدام النطاقات الطيفية الحمراء وتحت الحمراء القريبة:

- للقمر Landsat 7: استُخدمت النطاقات ['SR_B4', 'SR_B3'].
- للقمر Sentinel-2: استُخدمت النطاقات ['B8', 'B4'].

تتراوح قيم مؤشر NDVI بين (-1) للأسطح غير النباتية و(+1) للغطاء النباتي الكثيف.

ومن ثم حساب مؤشر التغير الزمني لاختلاف الغطاء النباتي (ΔNDVI) لرصد التحولات المكانية في الغطاء النباتي، وهي منهجية معتمدة لتقييم ديناميكيات التعافي في المناطق المتضررة من الحرائق [21-22]:

$$\Delta NDVI = NDVI_{2026} - NDVI_{2010}$$

حيث تُشير القيم الموجبة لـ ΔNDVI إلى حدوث تحسّن في حالة الغطاء النباتي (تعافي طبيعي)، بينما تعكس القيم السالبة تدهوراً أو فقداناً في الكتلة الحيوية نتيجة الحرائق أو التدخلات البشرية.

لتقييم طبيعة التغيرات الحاصلة في محمية الفرنلق، تم تصنيف منطقة الدراسة إلى أربع فئات رئيسة بناءً على قيم مؤشر ΔNDVI، وقد استندت هذه الفئات الرقمية إلى المعايير الموثقة في أدبيات تحليل اضطرابات الغابات، لا سيما المنهجية المقترحة من قِبل Kennedy وآخرون [23]، والتي تتيح التمييز بدقة بين حالات التدهور والنمو، كما يلي:

1. تدهور حاد Severe Degradation ($\Delta NDVI \leq -0.25$): تشمل المناطق التي شهدت انخفاضاً في قيم المؤشر نتيجة اضطرابات قوية (كالحرائق أو الاحتطاب الجائر).
2. غطاء مستقر Stable Cover ($-0.25 \leq \Delta NDVI \leq 0.1$): تمثل المناطق التي حافظت على توازنها الحيوي ضمن حدود التذبذب الطبيعي دون تغيرات ملموسة.
3. تعافي طبيعي Natural Recovery ($0.1 \leq \Delta NDVI \leq 0.25$): تضم المساحات التي أظهرت تحسناً تدريجياً في النشاط الضوئي، مما يشير إلى بدء تجدد الغطاء النباتي.
4. نمو مرتفع High Growth ($\Delta NDVI \geq 0.25$): تشمل المناطق التي شهدت زيادة نوعية في الكثافة النباتية.

يساهم هذا التصنيف الرباعي في تحويل القيم الطيفية المستمدة من الأقمار الصناعية إلى دلالات بيئية مكانية، مما يسمح لصناع القرار بتحديد النطاقات المتضررة وتتبّع كفاءة عمليات التجدد الطبيعي في المحمية.

4- تحليل Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats Analysis: لإسقاط المنهجيات العالمية على الواقع المحلي، تم استخدام تحليل (SWOT) كأداة استراتيجية [24] لتقييم البيئة الداخلية والخارجية لتطبيق المسح الأفقي في سورية، حيث يوفر هذا التحليل إطاراً منهجياً لفهم العوامل الإيجابية والسلبية التي قد تؤثر على نجاح تطبيقه في إدارة الغابات السورية، من خلال تحديد نقاط القوة والضعف والفرص والتهديدات، وقد دعمت دراسات حديثة هذا التوجه [25] وبيّنت أهمية المسح الأفقي في استشراف التهديدات المستقبلية للغابات على المستوى العالمي، كما وضح آخرون [26] أن دمج أدوات تحليلية مثل SWOT يُعزز دقة التقييم في قضايا الغابات.

بناءً عليه، تمّ وضع مخطط منهجي يمكن تقديمه لصناع القرار ومديري الحراج، ويمثل هذا المخطط الأساس الذي ستُبنى عليه نتائج الدراسة وتحليل جدوى تطبيق المسح الأفقي محلياً.

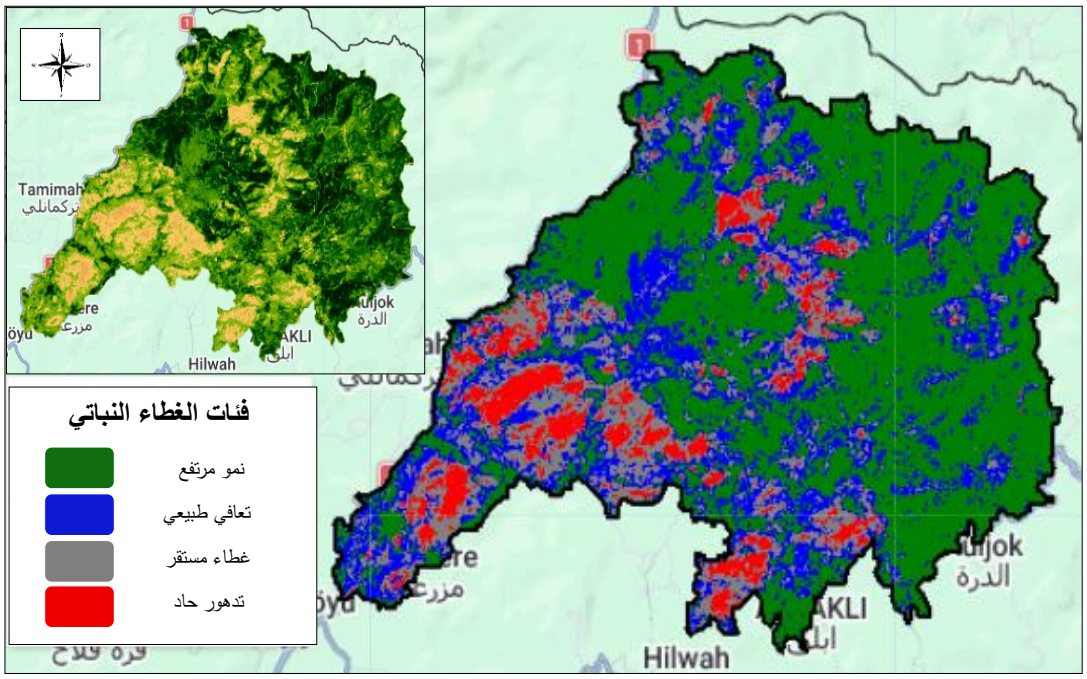
النتائج والمناقشة:

1- تحليل مؤشر التغير الزمني لاختلاف الغطاء النباتي (ΔNDVI):

أظهر تحليل مؤشر ΔNDVI للفترة الممتدة بين عامَي 2010 و2026 تبايناً واضحاً في استجابة الغطاء النباتي للضغوط البيئية وخاصةً الحرائق وقطع الأشجار الكلّي الذي يتبع حدوث الحرائق بغض النظر عن درجة احتراقها، حيث كشفت المعالجة الرقمية عن أربع فئات مكانية متمايزة (نمو مرتفع – تعافي طبيعي – غطاء نباتي مستقر – تدهور حاد) يوضحها الجدول (1) وفقاً لمساحتها ونسبتها المئوية، والشكل (1) الذي يبيّن التوزع المكاني لهذه الفئات.

الجدول 1. تصنيف فئات استجابة الغطاء النباتي في محمية الفرنلق (2010-2026)

فئة استجابة الغطاء النباتي	المساحة (هكتار)	النسبة المئوية (%)
نمو مرتفع	2921.24	54.43
تعافي طبيعي	1231.54	22.95
غطاء مستقر	829.36	15.43
تدهور حاد	385.68	7.19
المجموع	5367.82	100



الشكل (1). خريطة التوزيع المكاني لفئات الغطاء النباتي في محمية الفرنلق (2010-2026)

تمثل فئة التدهور الحاد 385.68 هكتار (7.19% من إجمالي مساحة المحمية) ما يُعرف في منهجية المسح الأفقي بـ "الإشارات الضعيفة Weak Signals"، وهي مؤشرات مبكرة قابلة للقياس تنذر بضغوط بيئية متراكمة قد تتحول إلى أزمات يصعب حلها لاحقاً إذا لم يتم تداركها [2].

في المقابل، تم تسجيل مساحة قدرها 1231.54 هكتار ضمن فئة التعافي الطبيعي (22.95% من إجمالي مساحة المحمية)، تُمثل "إشارات ناشئة إيجابية Emerging Positive Signals"، تُثبت قدرة المحمية على استعادة نشاطها الحيوي رغم الحرائق المتكررة بين عامي 2013 و 2025، تتوافق هذه النتيجة مع الدراسات المحلية التي أكدت أهمية التعاقب الطبيعي في محمية الفرنلق [27]، وتعكس ما توصلت إليه الأدبيات العلمية من أن الغابات المتوسطية تمتلك مرونة بيئية Ecological Resilience ملحوظة في التعافي من الحرائق عبر التجدد الطبيعي [28].

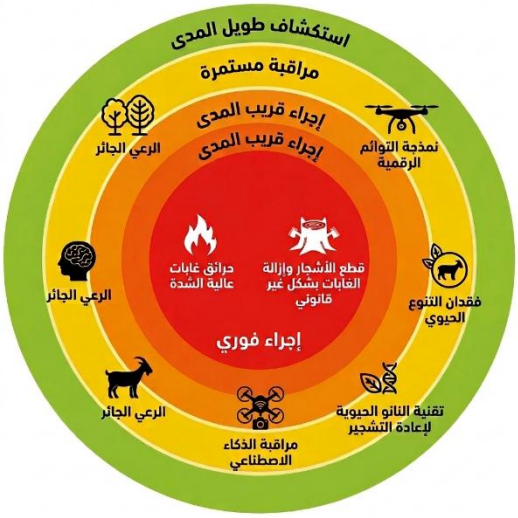
من منظور المسح الأفقي، فإن اكتشاف هذه "الإشارات الناشئة" يسمح لإدارة المحمية بتبني إدارة رشيقة Agile Management، والتحول نحو الغابات الدقيقة Precision Forestry عبر توجيه الموارد المالية والبشرية المحدودة لمراقبة بؤر التدهور التي تشكّل (7.19%) فقط، بدلاً من تعميم الجهود على كامل المساحات التي تعرضت لحرائق [29]، بالاعتماد على قدرة الطبيعة على ترميم نفسها في المناطق المتضررة، مما يقلل من تكاليف إعادة التشجير التقليدية ويحقق مفهوم الغابات الذكية بأدوات تقنية منخفضة التكلفة،

وبذلك يُجسّد تطبيق منهجية المسح الأفقي على محمية الفرنلق، الانتقالَ من التشخيص الوصفي العام إلى القياس الرقمي الكمي للإشارات البيئية كما يوضحها الجدول (2)، فالمناطق المصنفة ضمن التدهور الحاد تُدرج في الحلقة الداخلية لرادار المستقبل (الشكل 2) بوصفها تهديدات تستلزم تدخلاً فورياً Immediate Action، في حين تُدرج مناطق التعافي ضمن نطاق الإدارة التكيفية التي تستثمر مرونة النظام البيئي الطبيعية بدلاً من استنزاف الموارد في تدخلات مكلفة، وبهذا يُقلّص هذا التطبيق الفجوة بين الطموح التقني والواقع الاقتصادي في سورية، من خلال إثبات أن

أدوات الاستشعار عن بعد المجانية كافية لبناء نظام إنذار مبكر فعّال يتماشى مع الممارسات العالمية الحديثة في مراقبة الغابات [30].

الجدول 2. تصنيف النتائج وفق مفاهيم المسح الأفقي Horizon Scanning

النتيجة الرقمية	التصنيف البيئي	دلالة المسح الأفقي	الإجراء الإداري المقترح
7.19%	تدهور حاد	إشارات ضعيفة (Weak Signals)	تدخل فوري ورقابة صارمة
22.95%	تعافي طبيعي	إشارات ناشئة (Emerging Signals)	إدارة تكيفية وحماية سلبية
69.86%	غطاء متوازن	حالة راهنة (Baseline)	استدامة ومراقبة دورية



الشكل 2. رادار المستقبل – مصفوفة الأولويات في الغابات السورية

2-تحليل SWOT لتقييم تطبيق المسح الأفقي في الغابات السورية:

1- نقاط القوة Strengths:

- الكوادر الفنية المتخصصة: وجود كوادر فنية متمرسة في إدارة الغابات مع خبرة عملية واسعة.
- الخبرة البيئية المحلية: معرفة عميقة بالنظم البيئية المتوسطية وخصائصها الفريدة.
- البيانات التاريخية: توفُّر قاعدة بيانات تاريخية عن الغابات السورية تمتد لعقود.
- الشبكة الإدارية: شبكة واسعة من المحميات والغابات المدروسة والمدارة.
- الالتزام المؤسسي: وجود إطار مؤسسي للحراج يمكن البناء عليه.

2- نقاط الضعف Weaknesses:

- البنية التحتية التقنية: محدودية الوصول إلى التقنيات الحديثة (استشعار عن بعد، ذكاء اصطناعي).
- الفجوة المعرفية: نقص التدريب المتخصص على منهجيات الاستشراف الاستراتيجي الحديثة.
- تشتت البيانات: عدم وجود منصة موحدة لإدارة ومشاركة البيانات الخاصة بالغابات.
- محدودية الموارد المالية: ضعف التمويل المخصص للبحث والتطوير في قطاع الغابات.
- المقاومة للتغيير: الميل نحو الممارسات التقليدية والحذر من الطرائق والمقاربات الجديدة.

3- الفرص Opportunities:

- التعاون الدولي: إمكانية الشراكة مع منظمات دولية وإقليمية (FAO, UNDP, EU).
- التقنيات المجانية: توفر بيانات استشعار عن بعد مجانية وعالية الجودة (Sentinel-2, Landsat).

- الاهتمام العالمي: تزايد الاهتمام الدولي بالحفاظ على الغابات وتغير المناخ.
- أسواق الكربون: إمكانية الاستفادة من آليات تمويل الكربون (Carbon Credits).
- التحول الرقمي العالمي: تُوفر موجة التحول الرقمي أدوات وحلول جاهزة قابلة للتطبيق.
- الشبكات الإقليمية: وجود شبكات بحثية في المنطقة المتوسطية يمكن الاستفادة منها.

4- التهديدات Threats:

- تسارع التغير المناخي: زيادة حدة وتواتر الظواهر المناخية المتطرفة (جفاف، حرائق).
- الحرائق الكبرى: تصاعد غير مسبوق في وتيرة وشدة حرائق الغابات.
- الضغوط الاجتماعية–الاقتصادية: زيادة الاعتماد على موارد الغابات بسبب تدهور الأوضاع الاقتصادية.
- محدودية التمويل المستدام: صعوبة تأمين تمويل طويل الأجل للمشاريع الاستشرافية.
- عدم الاستقرار الإقليمي: التحديات الأمنية والسياسية التي قد تعيق التعاون والتطبيق.
- الفجوة التقنية: اتساع الفجوة بين الإمكانيات المحلية والتطورات التقنية العالمية.

مصفوفة SWOT الموسعة كإطار منهجي لتقييم تطبيق المسح الأفقي في الغابات السورية:

البُعد	التحديات	الحلول المقترحة	الفرص
القدرات الاستشرافية	- صعوبة الخروج من الأطر التقليدية. - محدودية التفكير متعدد التخصصات. - الانشغال بالتحديات الحالية زمانياً ومكانياً بدلاً من البحث عن الإشارات الضعيفة للتغييرات البعيدة.	- برامج تدريب على منهجيات الاستشراف الاستراتيجي. - ورش عمل تفاعلية متعددة التخصصات. - الاستفادة من مدربي استشراف محترفين (Foresight Facilitators).	- بناء ثقافة استشرافية في التعليم الجامعي والتدريب المستمر. - منح بحثية لدراسات الاستشراف في قطاع الغابات. - برامج تدريب مستمر للمشرفين.
البيانات والمعلومات	- تشتت المصادر. - تفاوت جودة البيانات. - صعوبة الوصول للبيانات المقيدة أو المكلفة.	- بناء منصات بيانات مفتوحة وموحدة. - وضع معايير موحدة لجودة البيانات والبيانات الوصفية (Metadata). - شراكات بين القطاعين العام والخاص لتحسين الوصول للبيانات.	- الاستفادة من التحول الرقمي (Big Data, AI). - منصات التعاون السحابية لتسهيل العمل الجماعي.
الفجوة بين الرصد والعمل	- تبقى نتائج المسح تقارير مكتبية دون ترجمة فعلية إلى سياسات وإجراءات عملية.	- دمج المسح الأفقي في دورات التخطيط الاستراتيجي الرسمية. - تعيين مسؤولي استشراف (Foresight Officers). - آليات متابعة لتحويل الرؤى إلى خطط عمل واقعية.	- تعزيز التعاون الدولي عبر شبكات استشراف إقليمية ودولية. - مشاريع بحثية مشتركة حول التحديات المشتركة. - تبادل أفضل الممارسات والدروس المستفادة.
التهديدات الخارجية	- تسارع التغير المناخي. - تصاعد وتيرة الحرائق الكبرى. - الضغوط الاجتماعية والاقتصادية. - محدودية التمويل المستدام. - عدم الاستقرار الإقليمي. - الفجوة التقنية.	- استثمار التعاون الدولي (UNDP, FAO, EU). - الاستفادة من أسواق الكربون (Carbon Credits). - مشاريع تجريبية صغيرة لبناء القدرات تدريجياً.	- الاهتمام العالمي المتزايد بالغابات وتغير المناخ. - موجة التحول الرقمي العالمي. - وجود شبكات بحثية متوسطية يمكن الاستفادة منها.

يشير تحليل SWOT والمصفوفة الموسعة إلى أن تطبيق المسح الأفقي في الغابات السورية يواجه تحديات بنيوية وتقنية، أبرزها محدودية البنية التحتية التقنية وضعف التمويل، إضافة إلى الضغوط المناخية والاجتماعية التي تزيد من هشاشة النظم البيئية. ومع ذلك، فإن وجود كوادر فنية متخصصة، وقاعدة بيانات تاريخية، وإطار مؤسسي قائم، يمثّل نقاط قوة يمكن البناء عليها لتقليل أثر هذه التحديات. كما أن الفرص المتاحة، مثل التعاون الدولي، والاستفادة من بيانات الاستشعار المجانية، والانخراط في أسواق الكربون، توفر إمكانيات عملية لتعزيز قدرات الرصد والتخطيط.

تُظهر المصفوفة أن الفجوة بين نتائج الرصد وتطبيق السياسات العملية هي من أبرز العقبات، مما يستدعي دمج المسح الأفقي في دورات التخطيط الاستراتيجي الرسمية، وتعيين مسؤولي استشراف، وتطوير آليات متابعة لتحويل الرؤى إلى خطط قابلة للتنفيذ، كما أن التهديدات الخارجية مثل تسارع التغير المناخي والحرائق الكبرى يمكن مواجهتها عبر مشاريع تجريبية صغيرة مدعومة بالتعاون الدولي، مع التركيز على بناء القدرات تدريجياً وتعزيز البنية التحتية التقنية.

بناءً على ذلك، فإن نجاح تطبيق المسح الأفقي في سورية يتطلب استراتيجية تدريجية تبدأ بمبادرات محدودة النطاق، تستفيد من الشراكات الدولية والتحول الرقمي، وتعمل على ترسيخ ثقافة الاستشراف في المؤسسات التعليمية والإدارية، بما يضمن استدامة الجهود ويعزز قدرة الغابات السورية على مواجهة التحديات المستقبلية.

3-إطار عمل متكامل للمسح الأفقي في الغابات السورية:

3-1- المبادئ الأساسية لإطار العمل: يرتكز الإطار المقترح على أربعة مبادئ رئيسة تمثل الركائز المنهجية لنجاح تطبيق المسح الأفقي في سورية:

1. المنهجية التشاركية: إشراك أصحاب المصلحة من مختلف القطاعات (الحكومية، الأكاديمية، المجتمعية)، بما يضمن التنوع المعرفي والشفافية في مشاركة النتائج وتبنيها.

2. الدورية والاستمرارية: اعتماد المسح الأفقي كعملية مستمرة تُنفذ عبر دورات منتظمة، مع تحديث قواعد البيانات بشكل دائم لضمان دقة المعلومات وتحديثها.

3. تعزيز عملية صنع القرار: ربط نتائج المسح الأفقي مباشرة بالتخطيط الاستراتيجي، من خلال آليات عملية لتحويل الرؤى المستخلصة إلى سياسات قابلة للتنفيذ ومتابعة أثرها.

4. المرونة والتكيف: القدرة على تعديل نطاق المسح وفق النتائج المستجدة، والانفتاح على أدوات وتقنيات جديدة، مع ترسيخ التعلم المستمر من التجارب المحلية والدولية.

3-2- مراحل التنفيذ المقترحة:

المرحلة	المدة الزمنية / شهر	الأنشطة الرئيسة
التأسيسية	6 - 0	• تشكيل فريق متعدد التخصصات. • تحديد نطاق المسح. • بناء قاعدة بيانات. • تدريب أولي.
التجريبية	18 - 6	• تنفيذ أول دورة مسح. • اختبار منهجيات مختلفة. • توثيق النتائج المستخلصة. • إصدار تقرير شامل.
التوسع	36 - 18	• توسيع نطاق المسح، وإشراك أصحاب مصلحة إضافيين. • بناء شراكات دولية. • دمج النتائج في التخطيط.
النضج	36 +	• اعتماد المسح كممارسة مؤسسية. • تقييم دوري. • قيادة وطنية في الاستشراف. • المساهمة في المعرفة العالمية.

4- رؤية مستقبلية (الغابات الذكية 2050):

في سيناريو مستقبلي متفائل، مشروط بتوفر البنية التحتية والدعم الدولي وذلك بالتعاون مع منظمات تتيح الوصول إلى منصات بيانات عالمية لتعويض النقص التقني في سورية، يمكن تصوّر الغابات في سورية عام 2050 كنظم بيئية ذكية تُدار من خلال تكامل مترابط بين:

- البنية التحتية الرقمية: من خلال شبكة شاملة من أجهزة الاستشعار الذكية Forest Internet of Things (IoT) تُوفر بيانات آنيّة، مدعومة بتوائم رقمية دقيقة محدّثة، وأنظمة ذكاء اصطناعي تدير العمليات الروتينية وتكشف الشذوذات البيئية والتشغيلية بشكل مبكر [31-34].

- الإدارة التكيفية: تساعد في اتخاذ قرارات مبنية على سيناريوهات محاكاة مستقبلية مصممة بدقة، مع استجابة فورية للتهديدات الناشئة (حرائق، آفات، أمراض)، وتحسين مستمر لهذه الممارسات عبر التعلم الآلي.
- التوازن البيئي – الاقتصادي: الوصول إلى غابات تدعم عزل الكربون، التنوع الحيوي، والإنتاجية الاقتصادية، مع وجود أسواق كربون شفافة وعادلة تكافئ الإدارة المستدامة، تدعمها مجتمعات محلية مزدهرة ومرتبطة عضوياً بحماية غاباتها [35-37].

لتحويل هذه الرؤية إلى واقع، يمكن الاستفادة من الأدوات والمنهجيات الاستشرافية الحديثة التي تتيح تحليل الإشارات الضعيفة، ورصد الاتجاهات الناشئة، وبناء سيناريوهات مستقبلية قابلة للتحويل إلى استراتيجيات تنفيذية [38].، وهو ما يعزز قدرة الغابات السورية على الانتقال نحو نموذج الغابات الذكية بحلول عام 2050. كما تُظهر الأدبيات المتخصصة في الاستشراف الغابي أهمية دمج هذه الأدوات في دعم اتخاذ القرار طويل الأمد في قطاع الغابات، وتعزيز القدرة على التنبؤ بالتغيرات المستقبلية [39]، ولتحقيق هذه الرؤية المستقبلية، يصبح من الضروري معالجة مجموعة من التحديات الأساسية، تشمل:

- الفجوة الرقمية: ضمان إتاحة التقنيات المتقدمة بشكل عادل وميسور التكلفة للبلدان النامية.
- الأخلاقيات والخصوصية: وضع أطر حوكمة واضحة لاستخدام الذكاء الاصطناعي في إدارة الموارد الطبيعية وحماية حقوق المجتمعات المحلية.
- المرونة المؤسسية: بتحويل المؤسسات التقليدية لتصبح أكثر استشرافية ومرونة وقدرة على التكيف مع التغيرات المتسارعة، من خلال تبني نهج التخطيط طويل الأمد وأدوات الاستشراف الغابي.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

يُثبت هذا البحث أن المسح الأفقي ليس مجرد إطار نظري استشرافي، بل منهجية قابلة للتطبيق الفعلي في بيئات هشّة كالغابات السورية رغم محدودية الموارد، وقد أسفر تطبيقه على محمية الفرنلق عن جملة من الاستنتاجات:

1. كشف تحليل NDVIΔ للفترة (2010-2026) أن 7.19% من مساحة المحمية تمثل إشارات ضعيفة تدل على تدهور حاد يستلزم تدخلاً فورياً، في حين تمثل 22.95% من مساحة المحمية إشارات ناشئة إيجابية تعكس مرونة بيئية ذاتية يمكن توظيفها كبديل عن التشجير الحراجي المكلف.

2. أثبتت أدوات الاستشعار عن بعد المجانية (Sentinel-2, Landsat, GEE) قدرتها على توليد بيانات كمّية دقيقة تُغني عن الاعتماد على تقنيات مكلفة غير متاحة في السياق السوري الراهن، مما يُقلّص الفجوة بين الطموح التقني والواقع الاقتصادي.

3. تُجسّد فئات استجابة الغطاء النباتي للاضطرابات، نموذجاً للانتقال من الإدارة التفاعلية إلى الإدارة الرشيقة، إذ تتيح الإشارات الكمية توجيه الموارد البشرية والمالية المحدودة نحو بؤر التدهور الحقيقية (385 هكتاراً فقط) بدلاً من التعميم الإداري على كامل المساحات المتضررة.

4. يُعزّز هذا التطبيق مبادئ الإدارة الدقيقة للغابات بأدوات مفتوحة المصدر، ويُثبت إمكانية بناء نظام إنذار مبكر فعّال للغابات السورية دون الحاجة إلى بنية تحتية رقمية متكاملة في المرحلة الراهنة.

التوصيات:

1. توصي الدراسة بتبني المنهجية المتبعة في هذا البحث كنموذج أولي (Prototype) قابل للتوسع والتطبيق على كافة المحميات والمناطق الحراجية السورية، مع ضرورة دمجها ببيانات أنظمة رصد الحرائق النشطة مثل FIRMS/MODIS، ويهدف هذا التكامل إلى بناء منظومة إنذار مبكر تتيح تحديد بؤر التدهور التي تتطلب تدخلاً فورياً بدقة مكانية عالية، كما تُشدد الدراسة على أولوية اعتماد الحلول المستندة إلى الطبيعة Nature-based Solutions (NbS) في استراتيجيات الترميم البيئي، حيث تساهم هذه الحلول في تعزيز قدرة النظم البيئية على الاستعادة الذاتية، مما يحقق كفاءة اقتصادية عالية عبر تقليل التكاليف الباهظة لعمليات التشجير الاصطناعي التقليدية، وضمان استدامة التنوع الحيوي على المدى الطويل.

2. إنشاء وحدة متخصصة ضمن وزارة الزراعة بالتعاون مع الهيئة العامة للاستشعار عن بعد، مهمتها الرئيسة رصد الإشارات الضعيفة للتدهور الحراجي باستخدام منصة GEE وما يماثلها من أدوات مفتوحة المصدر بالمرحلة الراهنة لتطوير قواعد بيانات حراجية وطنية موحدة وصولاً لتحقيق مبدأ الغابات الذكية (Smart Forests) بصورة تدريجية حين توفر البنية التحتية اللازمة.

3. بناء شراكات إقليمية مع البلدان التي تواجه تحديات مناخية مشتركة مثل دول حوض المتوسط، بما يُعزز الإحاطة بالإشارات الضعيفة العابرة للحدود كالتغير المناخي، والآفات المهاجرة، وتسهيل الوصول إلى البيانات والتقنيات المتقدمة مثل الاستشعار الفضائي وأدوات الذكاء الاصطناعي، ويُتيح الوصول إلى تمويل مشاريع الاستشراف الإقليمية وأسواق الكربون، ودعم بناء القدرات في إدارة موارد الغابات.

4. إدراج منهجيات الاستشراف والمسح الأفقي في المناهج الدراسية لعلوم الغابات والإدارة البيئية في الجامعات السورية.

References:

[1] D. N. Bengston, "Strategic Foresight for US Forest Service Research: A Horizon Scanning System", *Journal of Forestry*, Vol. 111, No. 4, pp. 239–246, 2013.

[2] A. Hines, "A Practitioner's View on the Future of Horizon Scanning", *Foresight* Vol. 5, No. 2, pp. 2–9, 2003.

[3] D. N. Bengston, L. M. Westphal, P. Adelson, J. Crabtree, M. J. Dockry, A. Hines, et al., "Emerging Signals of Change That Could Shape the Future of Forestry: A Horizon Scan," *Journal of Forestry*, Vol. 122, No. 2, pp. 152–158, 2024. doi:10.1093/jofore/fvad046.

[4] W. J. Sutherland, P. W. Atkinson, S. H. M. Butchart, M. Capaja, L. V. Dicks, E. Fleishman, et al., "A Horizon Scan of Global Biological Conservation Issues for 2022", *Trends in Ecology & Evolution*, Vol. 37, No. 1, pp. 95–104, 2022. doi:10.1016/j.tree.2021.10.014.

[5] W. J. Sutherland, P. N. M. Brotherton, H. M. Butterworth, S. J. Clarke, T. E. Davies, N. Doar, et al., "A Horizon Scan of Biological Conservation Issues for 2025", *Trends in Ecology & Evolution*, Vol. 39, No. 12, pp. 1085–1095, 2024. doi:10.1016/j.tree.2024.09.005.

[6] E. T. Tew, R. J. Smithers, G. F. Peterken, M. J. O. Pocock, T. Rayden, and J. M. Bullock, "A Horizon Scan of Issues Affecting UK Forest Management Within 50 Years", *Forestry*, Vol. 97, No. 1, pp. 1–15, 2023. doi:10.1093/forestry/cpad047.

[7] T. Hujala and P. Pelli, "Interactive Horizon Scanning of the Forest Bioeconomy with a Nested Business Environment Framework," *Futures & Foresight Science*, 2025. doi:10.1002/ffs.
[8] E. Pihl, E. Alfredsson, M. Bengtsson, K. J. Bowen, V. C. Broto, K. T. Chou, et al., "Ten New Insights in Climate Science 2020 – A Horizon Scan", *Global Sustainability*, Vol. 4, e2, 2021. doi:10.1017/sus.2020.2.
[9] United States Forest Service, "Looking Ahead to the Future of Forestry", Rooted in Research, no. 47, Northern Research Station, Newtown Square, PA, USA, 2025. [Online]. Available: https://www.fs.usda.gov/nrs/pubs/Rooted-in-Research/nrs_rooted-res_47_january2025.pdf
[10] N. Martynova, L. Häyrinen, S. E. Vedel, H. Peltola, and P. T. Stăncioiu, "Forest Carbon Management: A Review of Silvicultural Practices and Management Strategies Across Boreal, Temperate and Tropical Forests", *Current Forestry Reports*, Vol. 7, No. 4, pp. 220–235, 2021.
[11] M. Keyser, L. C. Estraviz Rodriguez, "Forestry 4.0: A framework for the future of the forest industry", *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 162, pp. 1016–1025, 2019.
[12] Arab Organization for Agricultural Development (AOAD), "Status of Agricultural and Forestry Digital Innovation in the Arab Region: Trends and Challenges", Arab Organization for Agricultural Development, Cairo, Egypt, Annual Report, (in Arabic), 2023.
[13] J. C. White, N. C. Coops, M. A. Wulder, M. Vastaranta, T. Hilker, and P. Tompalski, "Remote Sensing Technologies for Enhancing Forest Inventory and Enabling Sustainable Forest Management," *Remote Sensing*, Vol. 8, No. 1, Article 4, 2016.
[14] J. C. White, N. C. Coops, M. A. Wulder, T. Hermosilla, and G. W. Hobart, "Remote Sensing Technologies for Enhancing Forest Management: A Review of Recent Advances", *Forests*, Vol. 13, No. 2, Article 234, 2022. doi:10.3390/f13020234.
[15] S. Kanga, S. K. Singh, Sudhanshu, G. Meraj, M. Farooq, M. S. Nathawat, and I. Kochhar, "Disruptive Technologies in Forest Management: A Global Foresight Review", *Journal of Environmental Management*, Vol. 343, pp. 118–123, 2023.
[16] M. E. El Zein, S. M. Al Khateeb, N. A. Al Gounaim, and T. A. Al Qadi, "Climate Change and Forest Vulnerability: An Assessment of Fire Risk in the Mediterranean Region of Syria", *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 194, No. 11, Article 840, 2022.
[17] T. Mauno, P. Pelli, D. N. Bengston, J. Pykäläinen, and T. Hujala, "Piloting an Interactive Horizon Scanning of the Forest Bioeconomy in Finland", in *Proceedings of the European Biomass Science Forum (EBSF2025)* , 2025. https://zenodo.org/records/15527439
[18] M. Dayyoub, "Studying of Birds Diversity In Al Fronloq Protected Area - Latakia", Master's Thesis, Dept. of Forestry and Environment, Faculty of Agriculture, Tishreen University, Latakia, Syria, (in Arabic), 2015.
[19] N. Gorelick, M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, and D. Thau, R. Moore, "Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone", *Remote Sensing of Environment*, Vol. 202, pp. 18-27, 2017.
[20] S. Huang, F. Siegert, and U. Gessner, "Vegetation resilience and post-fire recovery assessment using multi-temporal satellite data", *Journal of Environmental Management*, Vol. 289, Article 112437, 2021.
[21] J. Wang, X. Li, Y. Chen, and H. Zhao, "Forest recovery assessment after wildfires using multi-source satellite time-series data", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 130, pp. 103–118, 2024.

[22] J. G. Lyon, D. Yuan, R. S. Lunetta, and C. D. Elvidge, "A change detection experiment using vegetation indices", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 64, No. 2, pp. 143–150, 1998.
[23] R. E. Kennedy, Z. Yang, and W. B. Cohen, "Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr — Temporal segmentation algorithms", *Remote Sensing of Environment*, Vol. 114, No. 12, pp. 2897-2910, 2010.
[24] D. W. Pickton and S. Wright, "What's SWOT in Strategic Analysis?" Strategic Change, Vol. 7, No. 2, pp. 101–109, 1998.
[25] W. J. Sutherland, S. Broad, J. Caine, M. N. Clout, L. V. Dicks, J. Dinsdale, et al., "A Horizon Scanning Assessment of Current and Future Threats to Global Forests", *Forestry*, Vol. 89, No. 5, pp. 449–462, 2016. doi:10.1093/forestry/cpw024.
[26] M. Kurttila, M. Pesonen, J. Kangas, and M. Kajanus, "Utilizing the Analytic Hierarchy Process (AHP) in SWOT Analysis—A Hybrid Method and Its Application to a Forest Certification Case", *Forest Policy and Economics*, Vol. 1, No. 1, pp. 41–52, 2000.
[27] M. Nasser, "Study of Plant Biodiversity in the Fronloq Reserve and the Impact of Environmental Disturbances on Species Regeneration", *Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Biological Sciences Series*,(in Arabic), Vol. 42, No. 2, 2020
[28] J. G. Pausas and J. E. Keeley, "Wildfires and Global Change", *Frontiers in Ecology and the Environment*, Vol. 19, No. 7, pp. 387–394, 2021. doi:10.1002/fee.2359.
[29] H. Kouifati, "Using Remote Sensing and GIS Techniques in Forest Fire Damage Assessment - Case Study of Pinus brutia Forests in Lattakia Governorate", *Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Biological Sciences Series*, (in Arabic) Vol. 40, No. 2, 2018.
[30] E. Chuvieco, F. Mouillot, G. R. van der Werf, et al., "Historical background and current developments for mapping burned area from satellite Earth observation", *Remote Sensing of Environment*, Vol. 225, pp. 45–64, 2019.
[31] W. Li, Q. Guo, M. K. Jakubowski, and M. Kelly, "A review of remote sensing, Internet of Things, and artificial intelligence for smart forestry", *Forest Ecology and Management*, Vol. 510, Article 120123, 2022.
[32] A. Krause, J. Müller, T. Peters, et al., "Digital Twins in Forestry: A Pathway to Precision Forest Management", *Forests*, Vol. 14, No. 5, Article 1023, 2023.
[33] Y. Zhang, H. Li, X. Chen, et al., "Integration of AI and Digital Twins for Sustainable Forest Ecosystems", *Remote Sensing*, Vol. 14, No. 18, Article 4567, 2022. doi:10.3390/rs14184567.
[34] *European Forest Institute (EFI)* , "Foresight Report: Digital Twins for Forest Decision Making," EFI Policy Brief, 2024.
[35] S. Wunder, "Payments for Environmental Services: Some Nuts and Bolts", *Center for International Forestry Research*, CIFOR Occasional Paper No. 42, Bogor, Indonesia, ISSN 0854-9818, 2005.
[36] S. Engel, S. Pagiola, and S. Wunder, "Designing Payments for Environmental Services in Theory and Practice: An Overview of the Issues", *Ecological Economics*, Vol. 65, No. 4, pp. 663–674, 2008. doi:10.1016/j.ecolecon.2008.03.011.
[37] S. Pagiola, "Payments for Environmental Services in Developing Countries", *Ecological Economics*, Vol. 71, No. 1, pp. 42–54, 2011.
[38] D. Vecchiato, "Futures studies and weak signals analysis for forest policy and management", *Forest Policy and Economics*, Vol. 138, Article 102720, 2022.
[39] D. N. Bengston, M. Dockry, and A. R. Shifley, "Anticipating forest futures: A review of foresight methods and applications in forestry", *Forest Ecology and Management*, Vol. 496, Article 119440, 2021.