

Evaluating the dynamics of forest fires using Remote Sensing and GIS Technologies: Case study forests of the Lattakia region


Dr. Maher Ali* 

(Received 16 / 5 / 2025. Accepted 13 / 10 / 2025)

□ ABSTRACT □

Forest fires, with their sudden and devastating nature, pose immense threats to both natural ecosystems and human communities in a changing climate. In this regard, assessing and monitoring burned areas is a critical step in developing sustainable forest management measures. Because traditional forest fire monitoring is time-consuming and inaccurate, this problem must be addressed using remote sensing technologies. This study aimed to evaluate the dynamics of burned forest sites and the severity of disturbance caused by fires in 2007 and 2015-2020 in the Lattakia region of Lattakia Governorate, Syria, using Landsat satellite image archives and spectral indices data. The study results indicate that during the period under study, approximately 8,230.74 hectares of forest area were burned in the Lattakia region, including 5,290.15 hectares of forest cover in 2020 alone. The study also demonstrated the recurrence of forest fires in the same location. The accuracy of the data obtained was verified using modern standards for geographic information statistics. This study can be used to develop effective preventive a by identifying the locations most vulnerable to forest fires.

Keywords: Forest fires, satellites, Landsat, Lattakia region, NBR index.

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

* Assistant Professor - Faculty of Agricultural Engineering- Lattakia University(formerly Tishreen) - Lattakia- Syria. maher.s.ali@tishreen.edu.sy).

تقييم ديناميكية حرائق الغابات باستخدام تقنيات الاستشعار عن بُعد ونظم المعلومات الجغرافية: حالة دراسية غابات منطقة اللاذقية


د. ماهر علي * 

(تاريخ الإيداع 16 / 5 / 2025. قبل للنشر في 13 / 10 / 2025)

□ ملخص □

تشكل حرائق الغابات، بطبيعتها المفاجئة والمدمرة، تهديدات هائلة للنظم البيئية الطبيعية والمجتمعات البشرية في ظل مناخ متغير. وفي هذا الصدد، يعد تقييم المناطق المحروقة ورصدها خطوة حاسمة في تطوير تدابير الإدارة المستدامة للغابات. وبما أن مراقبة حرائق الغابات التقليدية تستغرق وقتاً طويلاً وهي غير دقيقة، فلا بد من معالجة هذه المشكلة باستخدام تقنيات الاستشعار عن بُعد ونظم المعلومات الجغرافية. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم ديناميكيات مواقع الغابات المحروقة وخطورة الاضطرابات الناجمة عن الحرائق في عامي 2007 و 2015-2020 في منطقة اللاذقية بمحافظة اللاذقية، سوريا، باستخدام أرشيفات صور الأقمار الصناعية لاندسات وبيانات المؤشرات الطيفية. وتشير نتائج الدراسة إلى أنه خلال الفترة قيد الدراسة، احترق ما يقارب 8230.74 هكتاراً من مساحة الغابات في منطقة اللاذقية، منها 5290.15 هكتاراً من الغطاء الحرجي في عام 2020 وحده. وأظهرت الدراسة أيضاً تكرار حرائق الغابات في نفس الموقع كما حدث في عامي 2007 و 2020. وتم التحقق من دقة البيانات باستخدام المعايير الحديثة لإحصاءات المعلومات الجغرافية. يمكن استخدام هذه الدراسة لتطوير تدابير وقائية فعالة من خلال تحديد المواقع الأكثر عرضة لحرائق الغابات.

الكلمات المفتاحية: حرائق الغابات، الأقمار الصناعية، لاندسات، منطقة اللاذقية، مؤشر NBR.

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

* مدرس - كلية الهندسة الزراعية - جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً) - اللاذقية - سوريا، maher.s.ali@tishreen.edu.sy

مقدمة:

تُشكل حرائق الغابات إحدى أهم الاضطرابات الدورية التي تؤثر بشكل كبير في بنية وتوزيع النظم البيئية للغابات العالمية [2،43]. يمكن أن تؤدي حرائق الغابات إلى تآكل وزوال التربة، مما يتسبب في فقدان التنوع البيولوجي للنظام البيئي [10] والموائل والإنتاج والإنتاجية، وتعرض حياة البشر للخطر وتدمير سبل العيش [22]. بالإضافة إلى ذلك، فإن حرائق الغابات لها تأثير قوي على تغير المناخ بسبب الإطلاق السريع للكربون المخزن في الكتلة الحيوية للغابات في الغلاف الجوي [35]. في العقود الأخيرة، أدى تغير المناخ السريع إلى زيادة في تكرار وشدة حرائق الغابات [9]. إن استخدام بيانات أجهزة استشعار عن بُعد ساعدت بشكل كبير في اكتشاف الاضطرابات في النظم البيئية للغابات، وخاصة في تقييم ديناميكيات الحرائق المكانية والزمانية ورسم خرائط مواقع الحرائق [20،13]. أصبحت طرائق الاستشعار عن بُعد بديلاً غير مسبوق للأنشطة الميدانية المكلفة، والتي تتطلب عمالة مكثفة في مراقبة النظم البيئية للغابات على مناطق جغرافية واسعة ونائية [17]، حيث تعتبر الملاحظات الميدانية معقدة للغاية بشكل عام من ناحية المقاييس المكانية والزمانية، وخاصة عند تحديد فئات اضطرابات الغابات بعد الحرائق [30]. تُعد صور الأقمار الصناعية مصدراً رئيسياً للبيانات لتقييم مخاطر حرائق الغابات [32،21]. لقد تم استخدام صور الأقمار الصناعية متعددة الأطياف ذات الدقة المكانية العالية على نطاق واسع، وذلك من أجل رسم الخرائط على المستوى الإقليمي والعالمي، لتقييم مناطق الغابات قبل وبعد الحرائق بسرعة ودقة وبتكلفة منخفضة نسبياً [28]، وكذلك لتقييم شدة الحرائق [42]، واستعادة الغطاء النباتي [33]. في هذا الصدد، تساهم تقنيات الأقمار الصناعية سريعة التطور بشكل كبير في أتمتة عمليات الكشف عن الحرائق في الوقت الفعلي، فضلاً عن رسم خرائط المناطق المحروقة على نطاقات مكانية وزمانية مختلفة لتقييم مساحة حرائق الغابات وشدها [14،41]، باستخدام صور Landsat 8، و Sentinel-2 بشكل متكرر [1]. في السنوات الأخيرة، أصبح الذكاء الاصطناعي أداة مركزية في مجال رصد الكوارث البيئية، ولا سيما في تحليل حرائق الغابات وتقييم شدتها. فقد ساعدت خوارزميات التعلم الآلي، مثل Random Forest و Support Vector Machines، على تحسين دقة تصنيف المناطق المحترقة عند دمجها مع مؤشرات طيفية ناتجة عن بيانات الأقمار الصناعية مثل dNBR، وتُظهر الدراسات الحديثة أن استخدام صور Sentinel-2 مع تقنيات الذكاء الاصطناعي يمكن أن ينتج خرائط دقيقة لشدة الحريق بمستوى دقة يفوق 85%، مما يجعلها أدوات فعالة في تقييم الأثر البيئي والتخطيط لعمليات الترميم بعد الحريق [38]. على سبيل المثال، أن الجمع بين بيانات Sentinel-2 وخوارزميات التصنيف أدى إلى نتائج عالية الموثوقية في تحديد شدة الحريق، مع تحسين ملحوظ في مؤشرات الدقة الإحصائية مثل معامل كابا [39]. يعد استخدام المؤشرات الطيفية التي يتم الحصول عليها من صور الأقمار الصناعية لاندسات متعددة الفترات الزمنية، إحدى الطرق المستخدمة لتقييم المناطق المحروقة ودرجة الضرر بعد الحريق [44]، تعتبر هذه السلاسل الزمنية الخاصة بـ Landsat الأكثر ملاءمة لمراقبة الديناميكيات المكانية والزمانية نظراً لدقتها المكانية المتوسطة 30 متر، وإمكانية تكرارها الزمني لمدة 16 يوم، بالإضافة إلى أرشفتها الزمنية [15]. يُستخدم مؤشر الغطاء النباتي (NDVI) بشكل متكرر في هذه التقييمات، باستخدام صور متعددة الأزمنة (قبل وبعد الحريق)، كما يتم استخدام مؤشر الحرق القياسي NBR على نطاق واسع [40]، مؤشر RdNBR [26،18]، مؤشر الغطاء النباتي المعدّل للتربة SAVI، ومؤشر الغطاء النباتي الأمثل EVI [16،27]. اقترحت إحدى الدراسات تقسيم طرق الاستشعار عن بُعد لتقييم درجة الضرر الذي يلحق بالغابات في المناطق المحروقة إلى مجموعات فيزيائية وتجريبية، حيث تتضمن الطرق الفيزيائية الحصول على معلومات حول جسم محترق بناءً على تسجيل إشارة منعكسة

من سطح متضرر بواسطة جهاز كشف، تعتمد الأساليب التجريبية على الانحدار الإحصائي أو التعلم الآلي لتقدير المناطق المحروقة، وهي سهلة التنفيذ والتفسير نسبياً [31]. تفتقر العديد من بلدان العالم التي تعاني من حرائق الغابات إلى بيانات كافية عن مدى هذه الحرائق وتأثيرها وانتشارها ودرجة شدتها، وهو ما ينطبق بشكل خاص على الغطاء الحراجي في سورية [11]. في هذه البلدان التي تتميز ببنية معقدة ومجزأة في المناظر الطبيعية، عادة ما تكون لحرائق الغابات مساحات صغيرة، وفي الوقت نفسه غالباً ما تكون صور الأقمار الصناعية ذات الدقة المكانية العالية مصدراً مهماً، وفي بعض الحالات المصدر الوحيد للبيانات المستخدمة في تحديد المناطق المتضررة والمتدهورة نتيجة حرائق الغابات [23]. أجريت دراسة لتحديد المناطق المحروقة في سوريا بين أيلول وتشرين الأول عام 2020 باستخدام صور Sentinel-2، تم استخدام مؤشرات مثل NBR و dNBR و BAIS2 و NDVI لتحديد مدى تدمير الغابات وتصنيف مناطق الخطر [7] استخدمت صور القمر الأوروبي Sentinel 2A لرسم خريطة حريق فرزلا في محافظة اللاذقية عام 2019 وتحديد شدة الحريق، وذلك عبر حساب مؤشر الاختلاف في نسبة الحريق القياسي (dNBR) إذ بلغت مساحة الحريق الإجمالية 871.27 هكتار منها 166.298 هكتار كانت شدة الحريق فيها مرتفعة [8]. في إيطاليا، استخدم الباحثون صور Sentinel-2 ومؤشرات طيفية مثل NBR و dNBR لتحديد شدة الحرائق وتقييم الأثر على الغطاء النباتي. أظهرت الدراسة قدرة عالية في التمييز بين مناطق الحريق المختلفة، ومتابعة التعافي النباتي بعد الحريق [6]. في إسبانيا، تم إجراء تحليل لحرائق الغابات باستخدام التعلم الآلي في إقليم كتالونيا عام 2023، حيث دمجت الدراسة بيانات الاستشعار عن بُعد مع خوارزميات تعلم الآلة مثل Random Forest لتصنيف شدة الحريق وتحديد المناطق ذات الخطورة العالية للحرائق المستقبلية [3]. في تركيا، أجريت دراسة حول مراقبة حرائق الغابات في بحر إيجه باستخدام صور الأقمار الصناعية عام 2021، استخدمت في الدراسة صور Landsat و Sentinel-2 مع مؤشرات مثل NBR لتحليل حرائق الغابات وتقييم تأثيرها على الغطاء النباتي والتربة [4]. في قبرص، تم إجراء دراسة تقييم شدة حرائق الغابات باستخدام بيانات الاستشعار عن بُعد عام 2022، استخدمت الدراسة بيانات Sentinel-2 وتقنيات GIS لتحديد المناطق المتضررة بشدة من الحرائق، مع التركيز على التغيرات الموسمية في الغطاء النباتي [5]. تُظهر الدراسات الحديثة أهمية استخدام تقنيات الاستشعار عن بُعد في تقييم حرائق الغابات في سوريا من خلال تحديد مساحة المواقع المحروقة، حيث تُسهم هذه الدراسات في تقديم رؤى علمية تساعد في اتخاذ قرارات بيئية وإدارية فعالة للتعامل مع هذه الظاهرة.

أهمية البحث وأهدافه:

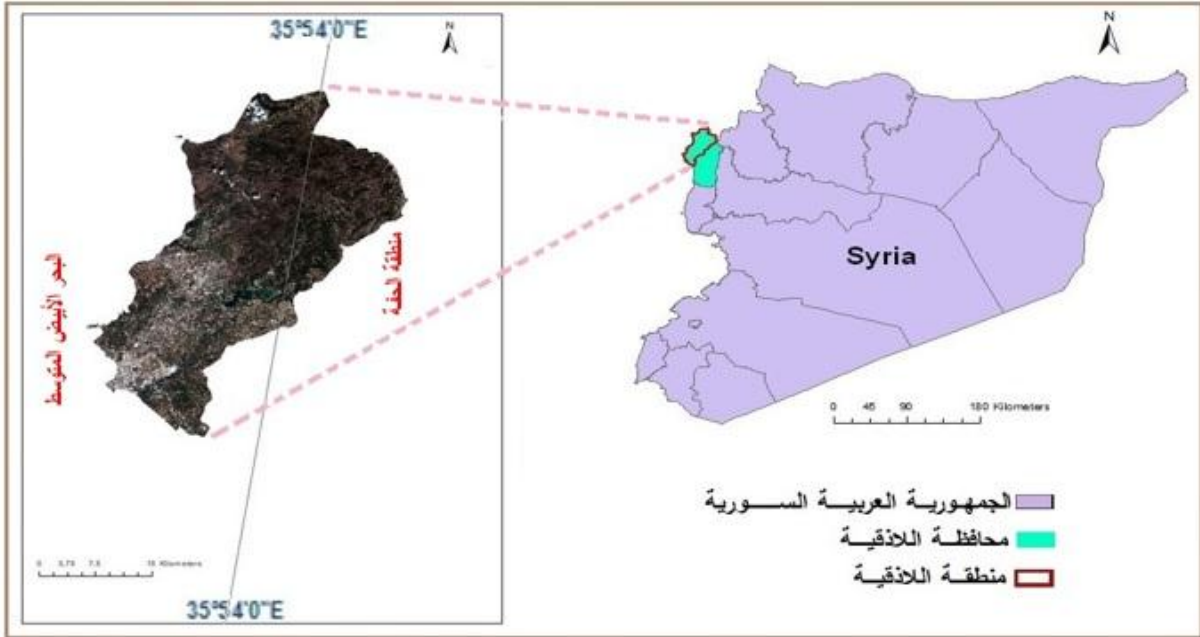
بُذلت جهود بحثية مكثفة على مدار القرن الماضي، لكشف وتقييم الديناميكيات الزمنية والمكانية المعقدة لحرائق الغابات. تعد دراسة حرائق الغابات وتقدير مساحاتها ودرجة ضررها أمراً أساسياً في تطوير حلول للإدارة المستدامة للغابات، وفي إعداد قاعدة بيانات مرجعية مؤرخة حول الحرائق التي حدثت في الماضي. تتعرض منطقة اللاذقية إلى حرائق كارثية في كل عام، وهناك توقعات بزيادة عدد ومساحات هذه الحرائق في المستقبل، وهذا التزايد مرتبط بشكل أساسي بالتغيرات المناخية واستخدامات الأراضي [29، 34]. يهدف العمل إلى تقييم مساحة المناطق المحروقة في منطقة اللاذقية التابعة لمحافظة اللاذقية في سورية في العام 2007، والأعوام 2015-2020، باستخدام مؤشرات NBR و dNBR و NDVI.

طرائق البحث ومواده:

لتحقيق هدف البحث تم تنفيذ المهام التالية:

1. إجراء تحليل لصور متعددة الأزمنة للقمر الصناعي Landsat 8,5، وصورة واحدة للقمر Sentinel-2B.
2. إجراء التصنيف المراقب (الموجه) لتصنيف فئات الغطاء الأرضي.
3. بناءً على العلاقة الرياضية لمؤشر NBR و dNBR ضمن برنامجي ArcGIS 10.3 و ENVI 5.1، تم تحديد مساحة المواقع المحروقة خلال 2007، 2015 - 2020.
4. تحديد شدة الحرائق في عام 2020 وتوزيعها الجغرافي بناءً على قيم dNBR المحسوبة.
5. حساب مؤشر NDVI للحصول على خريطة للغطاء الحراجي في منطقة اللاذقية عام 2017.
6. القيام بجولات ميدانية لتحديد العينات الاختبارية.
7. تم تقييم دقة النتائج التي تم الحصول عليها ضمن برنامج ENVI 5.1 باستخدام مصفوفة الفرق (Confusion Matrix).
8. منطقة الدراسة:

تتضمن الغطاء الحراجي الذي يقع على أراضي منطقة اللاذقية بمحافظة اللاذقية في سورية، الواقعة على الساحل الشرقي للبحر الأبيض المتوسط، وتعد منطقة اللاذقية من أهم وأغنى المناطق الحراجية في سورية، يوضح الشكل 1 الحدود الإدارية لمنطقة الدراسة.



الشكل 1. خريطة توضح الحدود الإدارية لمنطقة اللاذقية، محافظة اللاذقية

تتميز منطقة اللاذقية بمناخ البحر الأبيض المتوسط، تتكرر فيه فترات الجفاف في الصيف مما يؤدي إلى ازدياد خطورة انتشار حرائق الغابات وصعوبة إخمادها. يعد شهر أيلول وتشرين الأول من أصعب الفترات الزمنية لحدوث حرائق الغابات، وذلك نتيجة لطول فترة الانحباس المطري التي تمتد من نهاية آذار وحتى نهاية تشرين الأول، بالإضافة إلى هبوب الرياح الشرقية الجافة والشديدة السرعة التي تؤدي إلى انتشار النار بسرعة وعلى مساحات واسعة. يؤدي قرب الغابات من الأراضي الزراعية ضمن منطقة اللاذقية إلى زيادة احتمالية تعرضها للحرائق نتيجة للأنشطة البشرية، بما في ذلك الحرائق [25].

صور الأقمار الصناعية:

في الدراسة، تم استخدام قمرين صناعيين بدقة مكانية وزمانية مختلفة:

➤ تم استخدام صور لاندسات لرسم خرائط مواقع الحرائق كما هو موضح بالجدول (1)، تزامن زمن التقاط هذه الصور مع زمن حدوث الحرائق المتوسطة إلى الكبيرة، تم استخدام صور القمر Landsat لرسم مساحات هذه حرائق، أما الحرائق الصغيرة فلا يمكن تحديدها بدقة عند استخدام صور فضائية ذات دقة مكانية 30 م، وخاصة إذا كانت الحرائق تغطي مساحة أقل من بكسل واحد (أقل من 900 م²).

الجدول 1. الخصائص الرئيسية لصور Landsat المستخدمة.

المشهد	القمر الصناعي	الحالة	رقم الصورة	تاريخ التصوير
1	Landsat 5	قبل الحريق	LT05_L1TP_174035_20070620	20 حزيران 2007
2	Landsat 5	بعد الحريق	LC05_L1TP_174035_20070904	4 أيلول 2007
3	Landsat 8	قبل الحريق	LC08_L1TP_174035_20150608	8 حزيران 2015
4	Landsat 8	بعد الحريق	LC08_L1TP_174035_20150912	12 أيلول 2015
5	Landsat 8	قبل الحريق	LC08_L1TP_174035_20160620	20 حزيران 2016
6	Landsat 8	بعد الحريق	LC08_L1TP_174035_20161117	17 أيلول 2016
7	Landsat 8	قبل الحريق	LC08_L1TP_174035_20170629	29 حزيران 2017
8	Landsat 8	بعد الحريق	LC08_L1TP_174035_20171019	19 تشرين الأول 2017
9	Landsat 8	قبل الحريق	LC08_L1TP_174035_20180616	16 حزيران 2018
10	Landsat 8	بعد الحريق	LC08_L1TP_174035_20181107	7 تشرين الثاني 2018
11	Landsat 8	قبل الحريق	LC08_L1TP_174036_20190603	3 حزيران 2019
12	Landsat 8	بعد الحريق	LC08_L1TP_174035_20191126	26 تشرين الثاني 2019
13	Landsat 8	قبل الحريق	LC08_L1TP_174035_20200824	24 آب 2020
14	Landsat 8	بعد الحريق	LC08_L1TP_174035_20201027	27 تشرين الأول 2020

تم اختيار سلسلة من الصور متعددة الأطياف من القمر الصناعي Landsat 8,5 فوق أراضي منطقة اللاذقية على مدار الأعوام: 2007، 2015-2020. ونتيجة لذلك، تم اختيار 14 مشاهد (صور) لجميع فترات الدراسة بدقة مكانية تبلغ 30 متر. خضعت الصور للاستدلال الجغرافي ضمن برنامج Arc GIS، وللتصحيح الهندسي والإشعاعي القياسي G1، تم إجراء تصحيح جوي (الغيوم) لجميع صور Landsat في وحدة FLAASH، وتم إجراء محاذاة طيفية خطية للصور باستخدام برنامج ENVI-5.1. تم الحصول على صور متجانسة في منطقة اللاذقية، وأصبحت هذه الصور جاهزة للتحليل الطيفي.

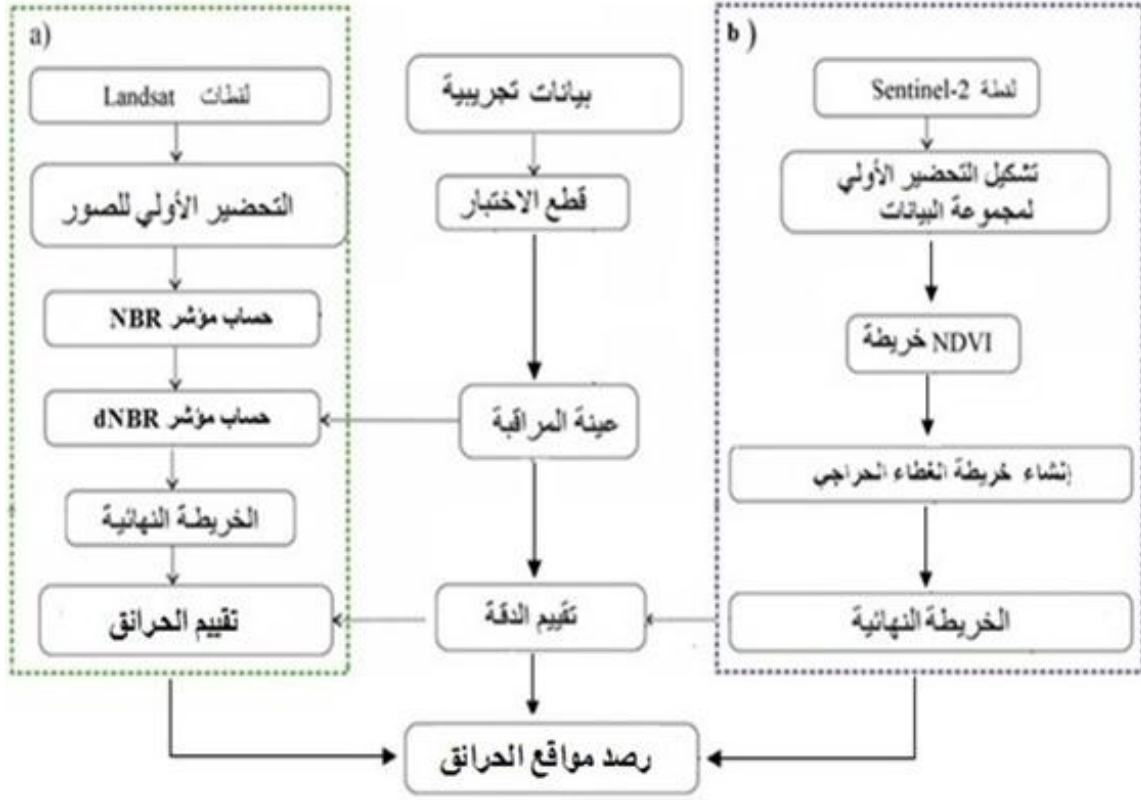
➤ استخدم القمر الصناعي Sentinel-2B في هذا البحث، باستخدام صورة واضحة من القمر الصناعي Sentinel-2B، التقطت في 3 أيلول 2017 فوق منطقة اللاذقية. خضعت صورة Sentinel-2B لتصحيح هندسي وإشعاعي أولي للإشعاع والظروف الجوية (الغيوم). استُخدمت 4 قنوات طيفية من أصل 13 للقمر الصناعي Sentinel-2B، وهي 2، 3، 4 (RGB) و 8 (NIR)، لإعداد خريطة للغطاء الحراجي بدقة مكانية عالية تبلغ 10 أمتار، كما هو موضح في الجدول رقم (2).

الجدول 2. خصائص القنوات الطيفية الأربعة ل Sentinel-2B.

No	Sentinel-2B قنوات	(mkm) المدى الطيفي	الدقة المكانية، م
1	Band 2 - Blue	0.490	10
2	Band 3 - Green	0.560	10
3	Band 4 - Red	0.665	10
4	Band 8 - NIR	0.842	10

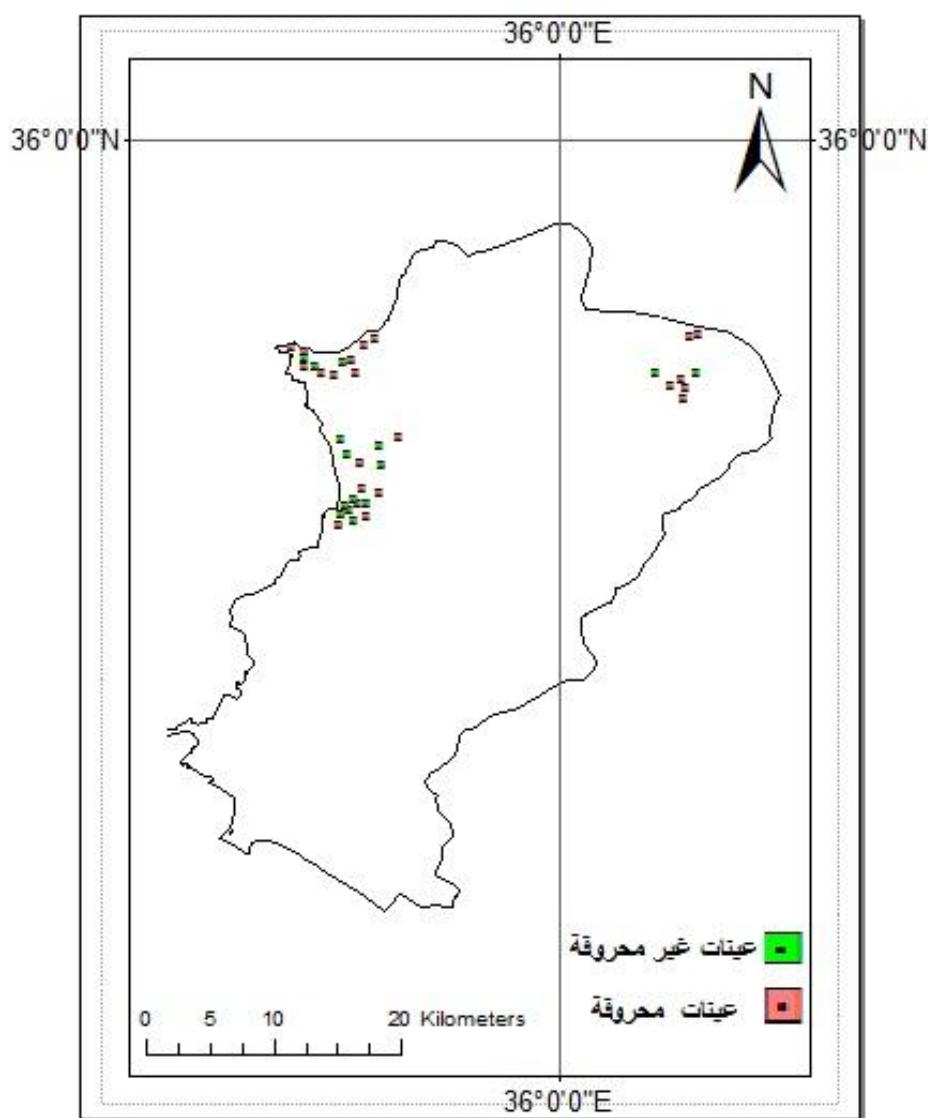
يوضح الشكل (2) مراحل تقييم ورصد مواقع حرائق الغابات باستخدام قمرين صناعيين مختلفي في الدقة المكانية. قُسمت هذه المراحل إلى مرحلتين: المرحلة الأولى: إعداد خرائط الحرائق في منطقة اللاذقية بالاعتماد على صور أقمار لاندسات الصناعية لسنوات مختلفة، بدقة مكانية متوسطة تبلغ 30 متر، المرحلة الثانية: إعداد خريطة للغطاء الحراجي بالاعتماد على صورة القمر الصناعي Sentinel-2B بدقة مكانية عالية تبلغ 10 أمتار. تم تحديد عينات المراقبة داخل المناطق المحروقة لتأكد من دقة الخرائط الموضوعية التي تم الحصول عليها باستخدام أدوات التحديد

Sampling Tool، تم اختيار 28 حوالي عينة عشوائية، 4 عينات في كل عام حريق، تم التأكد من أن جميع العينات تقع ضمن مواقع الحرائق، تم استخدام أداة Extract Values to Points لأخذ قيم NBR/NDVI لكل عينة.



الشكل 2. منهجية رصد مواقع حرائق الغابات: (أ) إعداد خرائط الحرائق بناءً على بيانات القمر الصناعي Landsat 8 (ب) إعداد خريطة الغطاء الحرجي وفقاً لبيانات القمر الصناعي Sentinel-2B

لتقييم مواقع ومساحات الحرائق في المناطق الحرجية في منطقة اللاذقية خلال الأعوام 2007، 2015-2020، كما هو موضح في العمل الميداني الذي أجري في المناطق المحروقة لتحديد قطع الأراضي الاختبارية في الفترة 2022-2024، تم تنفيذ العمل من خلال تحديد المواقع الجغرافية للحرائق على الأرض باستخدام (الزيارات الميدانية، وخرائط الأقمار الصناعية عالية الدقة، وياندكس عالي الدقة). يوضح الشكل (3) التوزيع المكاني للعينات المرجعية المستخدمة لتقييم الدقة. تم اختيار 37 نقطة مرجعية، تتكون من 23 عينة محروقة و 14 عينة غير محروقة. يتم تمثيل المناطق المحروقة والمناطق غير المحروقة برموز مميزة عن بعضها البعض. تم توزيع النقاط المرجعية عبر منطقة الدراسة لضمان التغطية المناسبة لكل من مواقع الغابات المتضررة وغير المتضررة من الحرائق، مما يعزز دقة ومصداقية نتائج التصنيف.



الشكل 3. التوزيع المكاني لعينات الغابات المحروقة وغير المحروقة ضمن منطقة الدراسة

تحليل صور أقمار الصناعية

1. تحليل صور Landsat 8

لتقييم مساحة الحريق ودرجة الضرر التي لحقت بالغطاء الحراجي نتيجة الحرائق في منطقة اللاذقية خلال الأعوام 2007، 2015-2020، تم استخدام صور القمر الصناعي Landsat، تم تنفيذ عمل ميداني في المواقع المحروقة لتحديد قطع أرض تجريبية (عينات مراقبة) في الفترة 2022-2024، وتم تنفيذ العمل من خلال تحديد مواقع الحرائق على الأرض باستخدام خرائط Google، خرائط الأقمار الصناعية، Yandex عالي الدقة، والزيارات الميدانية).

تم استخدام مؤشر الحرق القياسي (NBR - Normalized Burn Ratio) ويعرف بالاختلاف في الانعكاسات الطيفية في قنوات الأشعة تحت الحمراء القريبة والقصيرة، والتي تمكن التعبير عنها بالعلاقة الرياضية:

$$\text{NBR} = \frac{T M 4 - T M 7}{T M 4 + T M 7} \quad \text{من أجل Landsat 5}$$

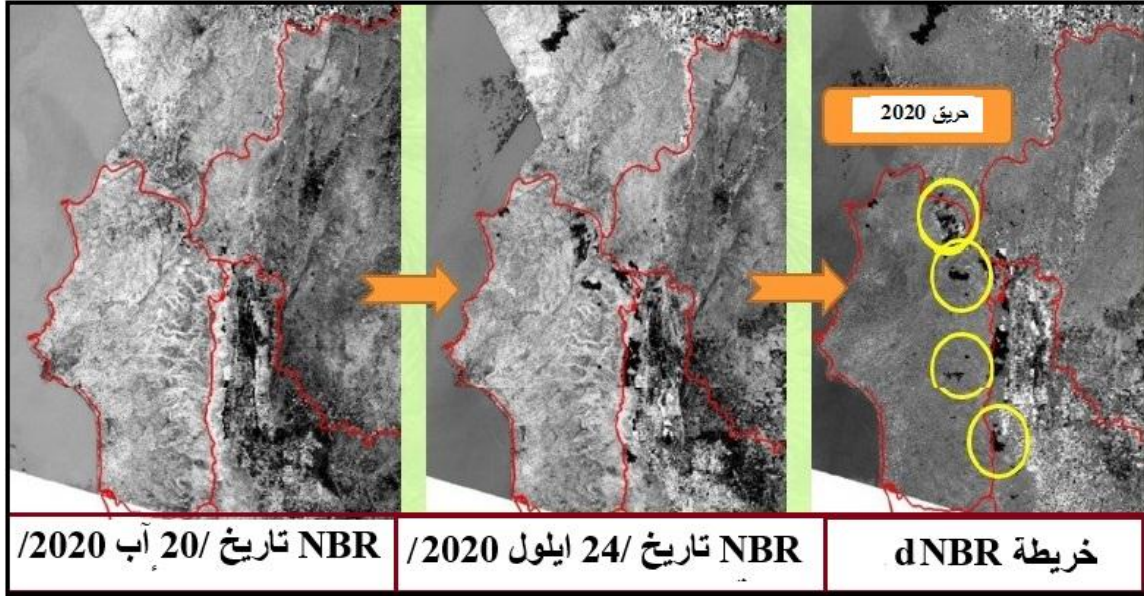
$$\text{NBR} = \frac{T M 5 - T M 7}{T M 5 + T M 7} \quad \text{من أجل Landsat 8}$$

حيث 5، 4 و TM7 هي القيم الطيفية لقناتين من القمر الصناعي لاندسات 5 و 8 في المدى (0.75 - 0.9 ميكرومتر)، و (2.09 - 2.35 ميكرومتر) على التوالي.

يحتوي المؤشر NBR الطبيعي على نطاق من القيم من -1 إلى +1. في مواقع الغابات غير المضطربة، يكون لهذا المؤشر قيم موجبة، في المناطق المفتوحة والمتضررة من الحرائق تكون قيمته سالبة. تميل قيمة NBR إلى الانخفاض مع زيادة الضرر الذي يلحق بالغطاء النباتي، والشرط الفيزيائي الحيوي لاستخدام هذا المؤشر في تقييم مواقع الحرائق: هو مقارنة الانعكاسات من الغطاء النباتي السليم والمتضرر من الحريق بناءً على صورتين في أوقات مختلفة.

$$dNBR = NBR \text{ (قبل الحريق)} - NBR \text{ (بعد الحريق)}$$

وبالنتيجة تم الحصول على صورة نقطية لـ dNBR استناداً إلى صور Landsat كما هو موضح بالشكل رقم (4).



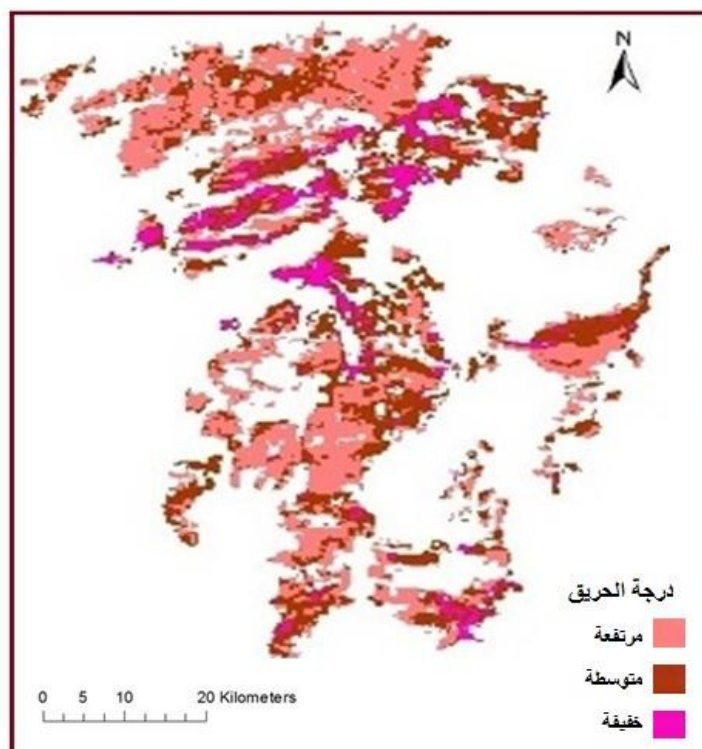
الشكل 4. الصورة النهائية لـ dNBR المستخرجة: قبل الحريق (آب 2020) وبعده (أيلول 2020) فوق أراضي محافظة اللاذقية باستخدام صور لاندسات متعددة الأزمنة

بناءً على قيم dNBR المحسوبة، صُنفت شدة الحريق إلى ثلاثة مستويات:

- منخفض/غير محترق : ($dNBR < 0.1$) مناطق لم تتأثر بالحرائق أو شهدت اضطراباً طفيفاً في الغطاء النباتي .
- متوسط ($0.1 - 0.44$): مناطق ذات ضرر ملحوظ في الغطاء النباتي وفقدان جزئي للغطاء النباتي .
- مرتفع : ($dNBR > 0.44$) مناطق متأثرة بالحرائق بشدة، تشمل مواقع فيها احتراق شديد للغطاء النباتي وموت كلي للغطاء النباتي .

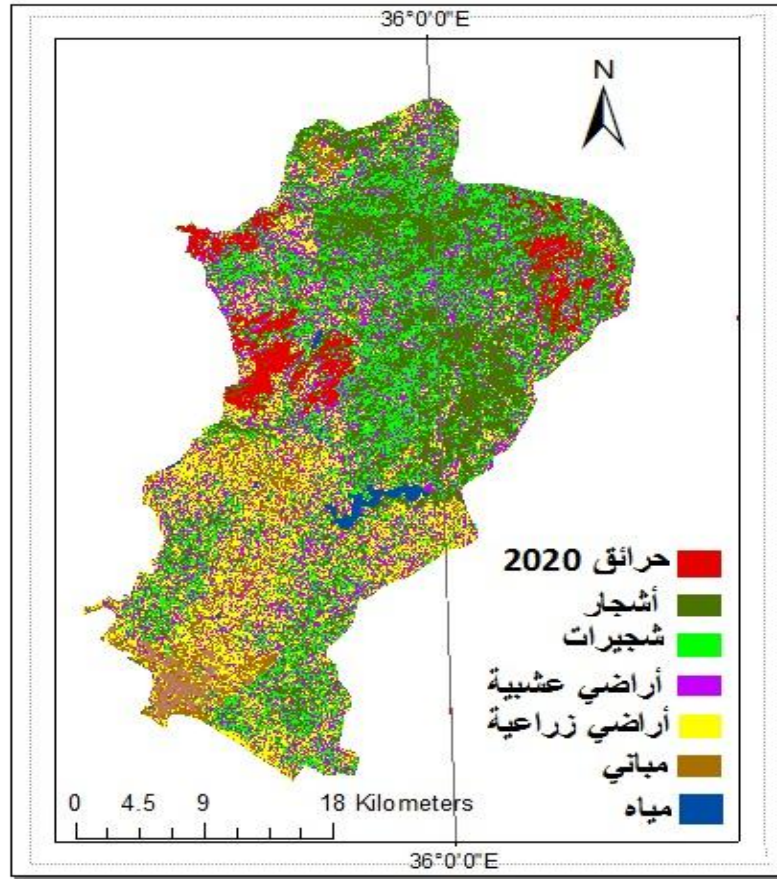
يساعد هذا التصنيف المبسط على تعزيز إمكانية تفسير النتائج ويوفر تمثيلاً موثقاً به لشدة الحرائق في جميع أنحاء منطقة الدراسة. تم تقسيم درجة الضرر في المناطق المحروقة من منخفضة إلى عالية (مناطق محروقة من الفئات 1 و 2 و 3)، وتم توضيح مساحتها في منطقة الدراسة بناءً على قيم dNBR المحسوبة. للقيام بذلك، واستناداً إلى بيانات الدراسات الميدانية وخرائط التضاريس الموجودة تم تشكيل طبقة نقطية نهائية لمناطق الغابات المحروقة في أراضي منطقة اللاذقية، تتكون من ثلاث فئات من الغطاء النباتي بدرجات متفاوتة من الضرر الناجم عن حرائق الغابات لعام 2020، كما هو مبين في الشكل رقم (5). تم إجراء فصل لفئات درجة الحريق في

برنامج ENVI-5.1، ومن ثم تحويلها إلى صيغة (Shap) في ENVI-5.1، ثم حساب مساحة كل فئة في برنامج ArcGIS-10.3.



الشكل 5. جزء من الطبقة الموضوعية لحريق عام 2020 في منطقة اللاذقية، تحتوي على ثلاث فئات من الغطاء النباتي وفقاً لدرجة الضرر الناجم عن الحرائق.

للحصول على خرائط موضوعية لحرائق الغابات من صور مؤشر الغطاء النباتي (NDVI) باستخدام برنامج ENVI 5.1، تم التصنيف باستخدام أسلوب التصنيف المشرف، بالاعتماد على مؤشر dNBR، مما أتاح تحديد مواقع الحرائق وتحديد شدتها ومساحتها. ونتيجةً لهذا التصنيف، تم الحصول على خريطة موضوعية لطرطوس، مقسمة إلى خمس فئات للغطاء الأرضي، وتم تمييز الحرائق باللون الأحمر، كما هو موضح في الشكل (6).



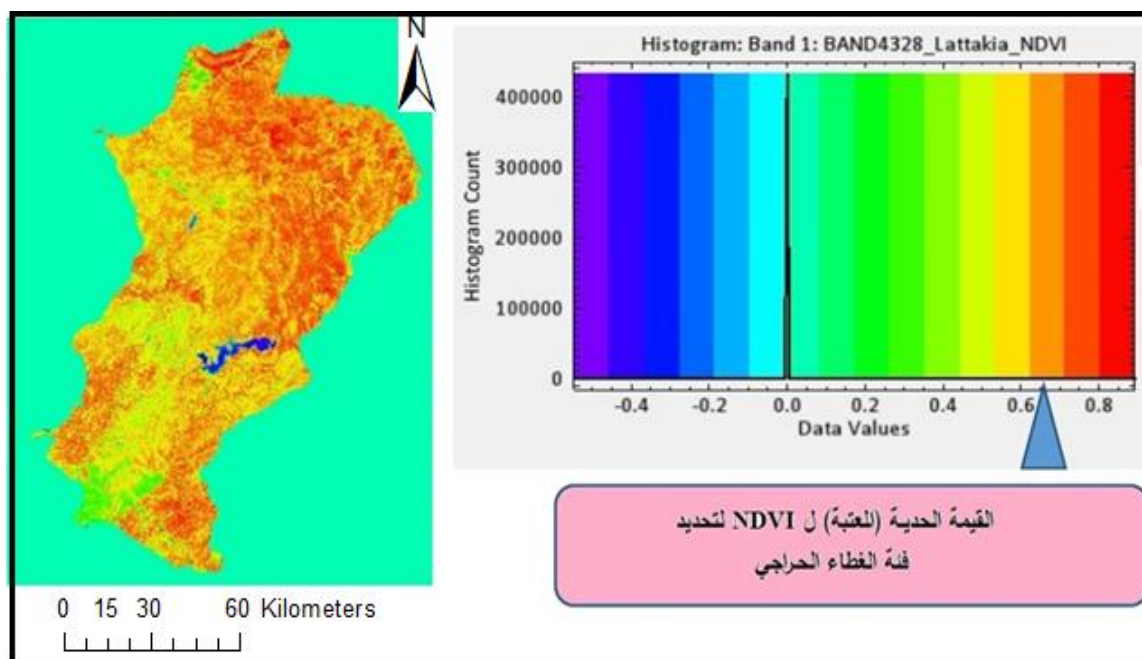
الشكل 6. الخريطة الموضوعية في منطقة اللانقية لـ 7 فئات تغطية أرضية، تم الحصول عليها بواسطة التصنيف الموجه يمكن رؤية مساحة مواقع الحرائق الكبيرة لعام 2020 على الخريطة (باللون الأحمر)

2. تحليل صور القمر الصناعي Sentinel-2B لإعداد خريطة الغطاء الحراجي.

تم الحصول على خريطة NDVI لمنطقة اللانقية كما هو موضح في الشكل (6) وذلك بتطبيق العلاقة الرياضية المستخدمة على نطاق واسع من قبل الباحثين في السنوات الأخيرة:

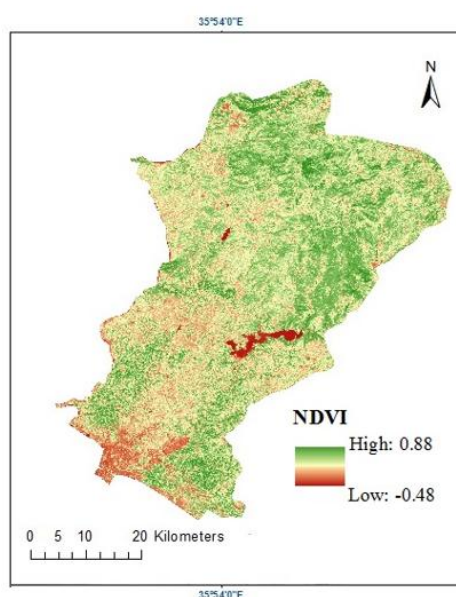
$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED),$$

NIR - نطاق الطيفي الأشعة تحت الحمراء القريبة، RED - نطاق الطيف الأحمر. تتراوح قيم المؤشر بين 1- و 1+. فأكثر، مما أتاح الحصول على خريطة لفئة الغطاء الأرضي على شكل طبقة نقطية (Raster)، كما هو موضح بالشكل رقم (7). بالنسبة للغطاء النباتي، تبدأ قيمة هذا المؤشر من 0.2 فأكثر، أما بالنسبة للغطاء الحراجي فتبدأ قيمة المؤشر من 0.65، بعد استبعاد فئات الغطاء الأرضي الأخرى كالأراضي الزراعية وأشجار الفاكهة وغيرها في ArcMap 10.3. أتاح الحصول على خريطة لفئة الغطاء الحراجي على طبقة (Shap)، كما هو موضح بالشكل رقم (8).

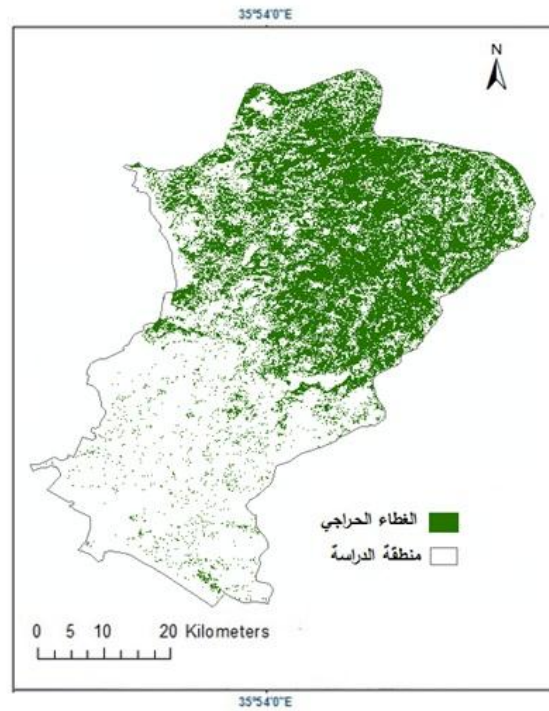


الشكل 6. المدى الطيفي للمؤشر NDVI ضمن منطقة الدراسة

تم التحقق من دقة ودرجة التطابق في الخرائط الموضوعية التي تم الحصول عليها مع الواقع الميداني (العينات الاختبارية) التي تم تحديدها ضمن المواقع المحروقة والمواقع الغير محروقة، والبيانات المرجعية حول مساحات حرائق الغابات في أعوام 2007 و 2015-2020 التي تم الحصول عليها من مديرية الزراعة في محافظة اللاذقية. تم إجراء تقييم دقة التصنيف بناءً على مصفوفة الفرق (Confusion Matrix) ضمن برنامج ENVI-5.1 حساب دقة التصنيف الإجمالية، ومؤشر كبا (Kappa)، والتي تُستخدم عادةً لهذه الأغراض في الأدبيات العلمية الحديثة [36-37].



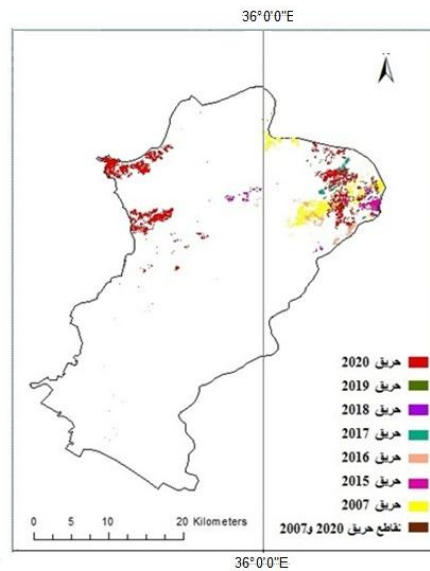
الشكل 7. الخريطة الموضوعية للغطاء الأرضي الناتجة عن مؤشر NDVI



الشكل 8. طبقة Shap للغطاء الحراجي استناداً إلى صورة القمر الصناعي Sentinel-2 وفقاً لمؤشر NDVI

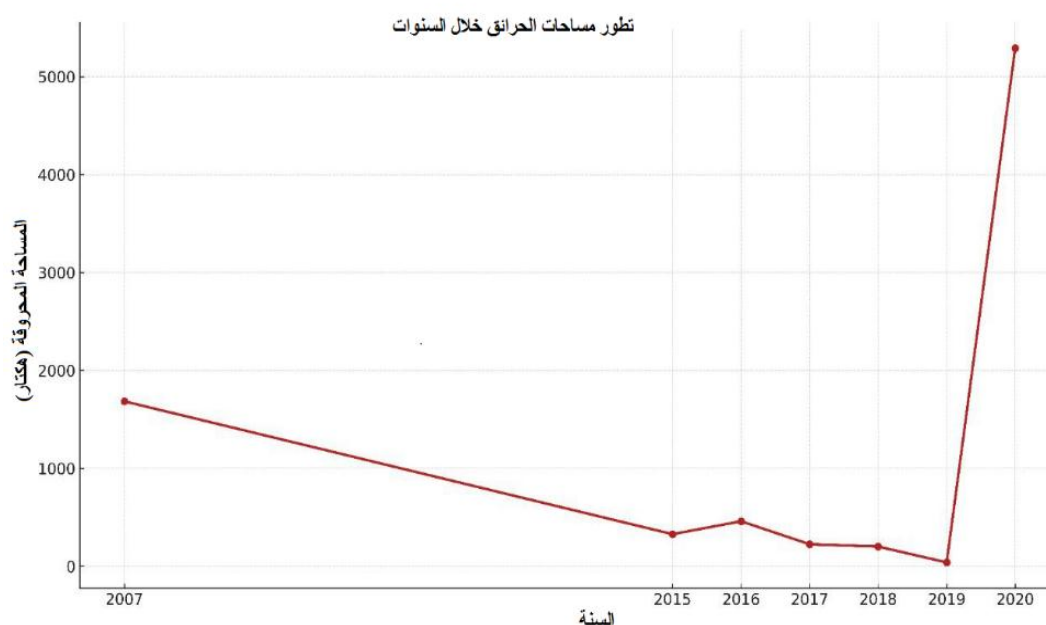
النتائج والمناقشة:

نتيجة لتصنيف (MASK) لحرائق الغابات في برنامج ENVI-5.1 مع تعميمها اللاحق ودمج الفئات ذات القيم الطيفية المماثلة في حزمة برامج ArcGIS 10.3، تم الحصول على خريطة موضوعية لتوزيع مواقع الحرائق خلال الفترة الزمنية المدروسة، كما هو موضح الشكل رقم (9).



الشكل 9. التوزيع الجغرافي لمواقع الحرائق خلال الأعوام 2007، 2015-2020 على أراضي منطقة اللاذقية

ويشكل عام وحسب نتائج الدراسة، فإن المساحة الإجمالية المناطق المحروقة في الأعوام 2007، 2015-2020 بلغت حوالي 8230,74 هكتار، يوضح الخط البياني كما هو موضح في شكل رقم (10) تغير مساحة الأراضي المتضررة من الحرائق (بالهكتار) خلال الأعوام: 2007، 2015-2020، ويُلاحظ أن هذه المساحات لم تكن منتظمة بل شهدت تذبذبات حادة مع وجود قمم وانخفاضات واضحة، حدثت أكبر مساحة محروقة في عام 2020 بمساحة تقدر بـ (5290,15 هكتاراً أو 64.27%) في المواقع الحراجية للصنوبر البروتي بمنطقة اللاذقية؛ يُرجح أن هذه القفزة ترتبط بعوامل غير اعتيادية من ظروف مناخية قاسية (موجات حر، رياح قوية، و جفاف شديد)، ضعف الاستجابة من قبل المعنيين على مكافحة الحرائق، بالإضافة إلى العامل البشري الذي لعب دور مهم في حدوث الحرائق عام 2020 بمساحات واسعة، يليها من حيث المساحة الحريق الذي حدث عام 2007 بمساحة إجمالية تقدر بحوالي 1684,86 هكتار أو ما يعادل نسبة 20.47% من مساحة الحرائق الإجمالية في منطقة اللاذقية خلال نفس الفترة، وهي ما تزيد عن البيانات الرسمية التي تم الحصول من مديرية الزراعة في محافظة اللاذقية.



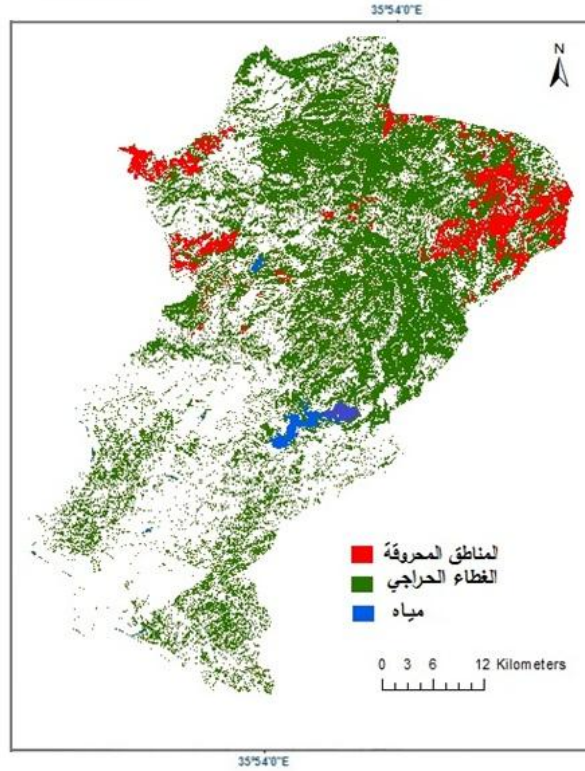
الشكل 10. يبين ديناميكية مساحة الحرائق الحراجية في منطقة اللاذقية خلال فترة الدراسة

يُلاحظ من تحليل مواقع انتشار الحرائق حدوث مرور (تقاطع) أكثر من حريق على نفس الموقع الحراجي، وهذا ما حدث بالفعل في عامي 2007 و 2020 بمساحة تقاطع تقدر بحوالي 297,15 هكتار. يحدث تكرار للحرائق أو تغير أنماطها مع الزمن نتيجة عوامل مؤثرة مختلفة، كما حصل للحريقين عامي 2007، 2020 حيث ازدادت مساحة الحريقين نتيجة ارتفاع كبير في درجات الحرارة، ازدياد في سرعة الرياح الشرقية الجافة، ضعف التدخل المبكر، وزيادة عدد الحرائق الكبيرة، مما أدى إلى تفاقم الوضع وصعوبة السيطرة على النيران.

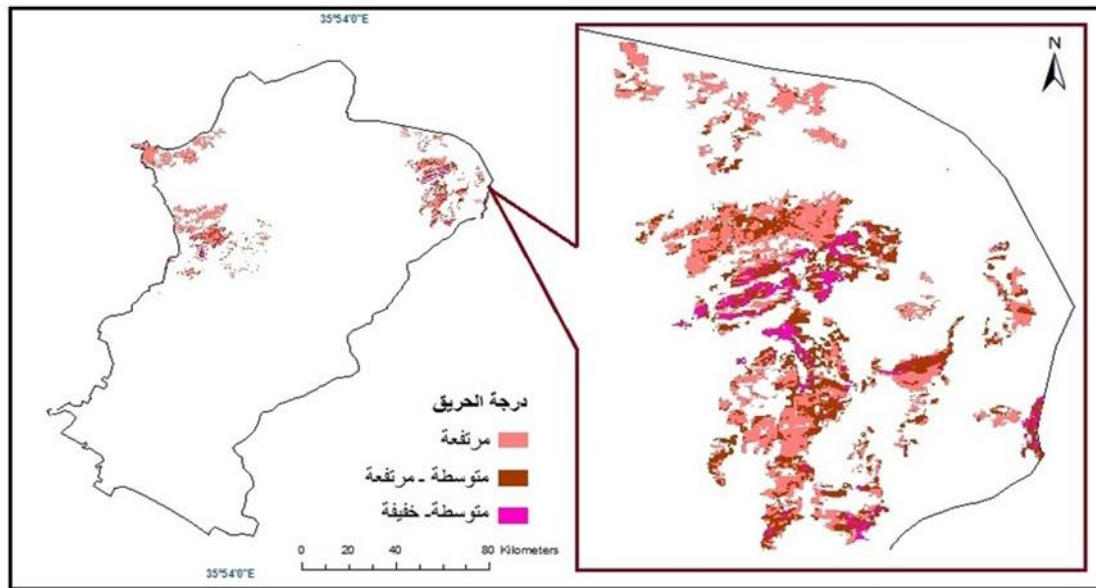
تركزت الحرائق بشكل أساسي في غابات الصنوبر البروتي، التي تعتبر من الأنواع الشديدة القابلية للاشتعال بسبب محتواها العالي من الزيوت الطيارة، ووجود كثافة عالية للغطاء الحراجي كما هو موضح بالشكل (11)، زاد من احتمال انتشار الحرائق، بالإضافة إلى التضاريس الجبلية الصعبة والوعرة التي شكلت عائق أمام رجال وآليات الإطفاء من القيام بواجباتها في إطفاء الحرائق بسرعة وفعالية، كل هذه الأسباب أنفة الذكر ساعدت مجتمعة على حرق وفقدان مساحات واسعة من الثروة الحراجية. إن تحليل نتائج هذه الحرائق يتطلب بالتأكيد إعداد خطة مفصلة للوقاية من حرائق

الغابات والسيطرة عليها في هذه المناطق. يوضح الشكل رقم (12) توزيع المواقع المتضررة من الحرائق وفقاً لشدة الحريق الذي لحق بالغطاء الحراجي في عام 2020:

- الدرجة الأولى: 3462,40 هكتار.
- الدرجة الثانية: 1436.14 هكتار.
- الدرجة الثالثة: 391.61 هكتار.



الشكل 11. توزيع المساحات المحروقة خلال الأعوام 2007، 2015-2020 على أراضي منطقة اللاذقية



الشكل 12. مستويات شدة الحريق عام 2020 والتوزيع الجغرافي له في منطقة اللاذقية

يوضح الجدول التالي (4) مصفوفة الارتباك لعينات الغابات المحروقة وغير المحروقة، بما في ذلك دقة المنتج، ودقة المستخدم، يضمن هذا التقييم دقة موثوقة لنتائج التصنيف.

الجدول (4). مصفوفة الارتباك لعينات الغابات المحروقة وغير المحروقة

العينات	مصنفة محروقة	مصنف غير محروقة	العينات الكلية	دقة المنتج	دقة المستخدم
المحروقة	20	3	23	87%	90%
غير محروقة	2	12	14	85%	80%
المجموع	22	15	37	—	—

تشير دقة المنتج (PA) إلى احتمال تصنيف عينة مرجعية بشكل صحيح. وهي تعكس خطأ التصنيف، حيث يحدث الخطأ عند استبعاد عينات من فئة ما. تمثل دقة المستخدم (UA) موثوقية التصنيف لكل فئة، أي احتمال أن تنتمي العينة المصنفة في فئة معينة إلى تلك الفئة بالفعل. في هذه الدراسة، حققت الفئات المحروقة دقة منتج بنسبة 87% ودقة مستخدم بنسبة 90%، بينما حققت الفئات الغير المحروقة دقة منتج بنسبة 85% ودقة مستخدم بنسبة 80%. تؤكد النتائج الإجمالية الدقة العالية للتصنيف، حيث قدر معامل كابا البالغ حوالي 0.79، والدقة الكلية 0.86.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

- أظهرت نتائج الدراسة أنه من الممكن بنجاح اكتشاف المناطق المحروقة وتقييم شدة الضرر باستخدام مؤشرات الاستشعار عن بُعد وصور الأقمار لاندسات.
- أظهرت مؤشرات NBR و dNBR المستخدمة في هذه الدراسة نتائج مقبولة، مما يدل على ملاءمة هذه المؤشرات.
- تعرضت بعض المواقع الحراجية لمرات عديدة من الحرائق، إذ تركزت النسبة الأكبر من مساحة حرائق الغابات في عام 2020 (5290,15 هكتاراً، أي بنسبة 64.27%) في المناطق الجبلية بمنطقة اللاذقية.

التوصيات:

- إجراء المزيد من المراقبة للمناطق الحراجية المحروقة في سورية باستخدام بيانات القمر الصناعي Sentinel-2 الذي يتمتع بدقة مكانية أعلى.
- تدريب الكوادر على استخدام أدوات الاستشعار عن بُعد ونظم المعلومات الجغرافية.
- تشكيل قاعدة بيانات تتعلق بمساحة الحرائق وتوزعها الجغرافي بشكل دوري بحيث تدخل هذه المعطيات ضمن برنامج للحاسوب يمكن من خلاله إعطاء معطيات ضرورية لإدارة حرائق الغابات.
- بعد حدوث حرائق الغابات من الضروري تحديد المساحات المحروقة وتحديد نوع الحريق وشدته من أجل تحديد الأماكن الواجب التدخل فيها لإزالة جذوع الأشجار المحروقة بشكل كلي أو جزئي، وكذلك تحديد المناطق التي قد تتعرض لخطر انجراف التربة، والمواقع التي يجب التدخل فيها بالتشجير.

References:

- [1] A. V. Kashnitsky, Method of automatic detection of damage to vegetation cover by natural fires based on data from Landsat and Sentinel-2 series satellites, *Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space*. Vol. **19**, №.6 pp. 29-38, (2022).
- [2] A. Alencar, J.Z. Shimbo, F. Lenti, C.B. Marques, B. Zimbres, M. Rosa, V. Arruda, et al. Mapping three decades of changes in the Brazilian savanna native vegetation using Landsat data processed in the Google Earth Engine platform, *Remote Sensing*. Vol. **12**, (2020).
- [3] M. S. Ali, S. A. Lezhnin, O.N. Vorobyov, E.A. Kurbanov, Monitoring the vegetation cover of the Latakia governorate of the Syrian Arab Republic using Landsat images, *Bulletin of the Volga Region State Technological University. Series: Forest. Ecology. Nature Management*. Vol. **47**, P. 19–31, (2020).
- [4] T. Katagis, I. Z. Gitis, Accuracy estimation of two global burned area products at national scale, *FORECO 2021 IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. **932**, Pp. 1–10 , (2021).
- [5] C. H. Key, Remote sensing sensitivity to fire severity and fire recovery In J. de la Riva and E. Chuvieco, eds, Proceedings of the 5th International Workshop on remote sensing and GIS applications to forest fire management: fire effects assessment. *Universidad de Zaragoza*, Spain. Pp. 29–39, (2005).
- [6] E. Kurbanov, O. Vorobev, S. Lezhnin, J. Sha, J. Wang, X. Li, J. Cole, D. Dergunov, Y. Wang, Remote sensing of forest burnt area, burn severity, and post-fire recovery: a review, *Remote Sensing*. Vol. **14**, №.19, (2022).
- [7] E. Kurbanov, O. Vorobev, S. Lezhnin, Y. Polevshikova, E. Demisheva, Assessment of burn severity in Middle Povozye with Landsat multitemporal data, *International journal of Wildland Fire*. Vol. **26**, №.9, (2017).
- [8] Y. Lan, J. Wang, W. Hu, E. Kurbanov, J. Cole, J. Sha, Y. Jiao, J. Zhou, Spatial pattern prediction of forest wildfire susceptibility in Central Yunnan Province, China based on multivariate data. *Natural Hazards*. Vol. **26**, №.9, P. 565-586, (2022).
- [9] S. Liu, Y. Zheng, M. Dalponte, X. Tong, A novel fire index-based burned area change detection approach using Land-sat-8 OLI Data, *European Journal of Remote Sensing*. Vol. **53**, P. 104-112, (2020).
- [10] X. Liu, C. Zheng, G. Wang, F. Zhao, Y. Tian, H. Li, Integrating Multi-Source Remote Sensing Data for Forest Fire Risk Assessment, *Forests*. Vol. **15**, (2024).
- [11] T. Loboda, O. Krankina, I. Savin, E. Kurbanov, H. Joanne, Land management and the impact of the 2010 extreme drought event on the agricultural and ecological systems of European Russia In Land-Cover and Land-Use Changes in Eastern Europe after the Collapse of the Soviet Union in 1991, *Springer International Publishing: Cham*, Switzerland. (2017).
- [12] T. Long, Z. Zhang, G. He, W. Jiao, C. Tang, B. Wu, X. Zhang, G. Wang, R. Yin, 30 m resolution Global annual burned area mapping based on Landsat images and Google Earth Engine, *Remote Sensing*. Vol. **11**, №.5, (2019).
- [13] L. Malambo, C.D. Heatwole, Automated training sample definition for seasonal burned area mapping, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. **160**, P. 107–123, (2020).
- [14] FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. *Global Forest Resources Assessment: Main Report*. Rome, Italy, (2020).

- [15] S. Nasery, K. Kalkan, Burn area detection and burn severity assessment using Sentinel 2 MSI data: The Case of Karabağlar District, İzmir, Turkey, *Turkish Journal of Geosciences*. Vol. **1**, №.2, Pp. 72–77, (2020).
- [16] M. S. Ali, O.N. Vorobyov, E.A. Kurbanov, The “decision tree” algorithm for classifying forests of the Syrian Arab Republic based on the SENTINEL-2 image, *Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Forest. Ecology. Nature Management*. Vol. **45**, P. 5–30, (2020).
- [17] F. Ngadze, K.S. Mpakairi, B. Kavhu, M. S. Maremba, Exploring the utility of Sentinel-2 MSI and Landsat 8 OLI in burned area mapping for a heterogenous savannah landscape, *PLoS ONE*. Vol. **15**, №.5, (2020).
- [18] G. Otón, R. Ramo, J. Lizundia-Loiola, E. Chuvieco, Global detection of long-term (1982–2017) burned area with AVHRR-LTDR data, *Remote Sensing*. Vol. **11**, №.18, (2019).
- [19] P. Pereira, M. Francos, E. C. Brevik, X. Ubeda, I. Bogunovic. Post-fire soil management, *Current Opinion in Environmental Science and Health*. Vol. **5**, P. 26–32, (2018).
- [20] N. Quintero, O. Viedma, I. R. Urbieto, J. M. Moreno, Assessing landscape fire hazard by multitemporal automatic classification of Landsat time series using the Google Earth Engine in West-Central Spain. *Forests*. Vol. **10**, P.1–30, (2019).
- [21] N. C. Santana, O.A. De Carvalho Júnior, R.A.T. Gomes, R.F. Guimarães, Burned-area detection in Amazonian environments using standardized time series per pixel in MODIS data. *Remote Sensing*. Vol. **10**, №.12, (2018).
- [22] N. O. Soverel, D.D.B. Perrakis, N.C. Coops, Estimating burn severity from Landsat dNBR and RdNBR indices across western Canada, *Remote Sensing of Environment*. Vol. **114**, №.9, (2010).
- [23] E. Chuvieco, F. Mouillot, G.R. Van Der Werf, J. San Miguel, M. Tanasse, et al. Historical background and current developments for mapping burned area from satellite Earth observation, *Remote Sensing of Environment*. Vol. **225**, P. 45–64, (2019).
- [24] S. Talukdar, P. Singha, S. Mahato, S. Shahfahad, A. Rahman, Land-use land-cover classification by machine learning classifiers for satellite observations—A review, *Remote Sensing*. Vol. **12**, №.7, (2020).
- [25] O. N. Vorobiev, E.A. Kurbanov, Remote monitoring of vegetation restoration dynamics on burnt-out areas of the Mari forest Trans-Volga region, *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. Vol. **2**, №.14, P. 124–134, (2017).
- [26] FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. *The State of the World's Forests*. In Forests, Biodiversity and People. Rome, Italy, (2020).
- [27] O. N. Vorobiev, E.A. Kurbanov, A. V. Gubaev, S. A. Lezhnin, Y. A. Polevshchikova, Remote monitoring of forest burnt areas in the Mari Trans-Volga region, *Bulletin of the Volga State Technological University. Ser.: Forest. Ecology. Nature management*. №.1, P. 12–22, (2012).
- [28] M. S. Ali, R. G. Zeina, Monitoring forest burned areas of Muhafaza Latakia of the Syrian Arab Republic using Remote Sensing and GIS Technologies, *Forest Ecosystems in the Context of Climate Change: Biological Productivity and Remote Monitoring*, №.9, P. 87–101, (2023).
- [29] C. Yue, P. Ciais, P. Cadule, K. Thonicke, T.T. Van Leeuwen, Modelling the role of fires in the terrestrial carbon balance by incorporating SPITFIRE into the global vegetation model ORCHIDEE—Part 2: Carbon emissions and the role of fires in the global carbon balance, *Geoscientific Model Development*. Vol. **8**, P. 1285–1297, (2015).

- [30] E. G. Shvetsov. Assessments of forest disturbance in central Siberia's southern regions according to satellite imagery. *Forest ecosystems under climate change: biological productivity and remote monitoring*. № 8, P. 26-34, (2022).
- [31] T. Artés, D. Oom, D. De rigo, T.H. Durrant, P. Maianti, G. Libertà, J. San-miguel-ayanz, A global wildfire dataset for the analysis of fire regimes and fire behavior, *Scientific Data*. Vol. 6, pp. 296, (2019).
- [32] A. F. J. Brecka, Y. Boulanger, E.B. Searle, A.R. Taylor, D.T. Price, Y. Shahia, Sustainability of Canada's forestry sector may be compromised by impending climate change, *Forest Ecology and Management*. Vol. 474, (2020).
- [33] B. C. Bright, A.T. Hudak, R.E. Kennedy, J.D. Braaten, K.A. Henareh, Examining post-fire vegetation recovery with Landsat time series analysis in three Western North American Forest Types, *Fire Ecology*. Vol. 15, №. 8, (2019).
- [34] M. L. Campagnolo, D. Oom, M. Padilla, J.M.C. Pereira, A patch-based algorithm for global and daily burned area mapping, *Remote Sensing of Environment*. Vol. 232, (2019).
- [35] H. Etchellsa, A.J. O'donnella, W.L. Mccawb, P.F. Griersona, Fire severity impacts on tree mortality and post-fire recruitment in tall eucalypt forests of southwest Australia, *Forest Ecology and Management*. Vol. 459, (2020).
- [36] FAO. The State of the World's Forests 2018. *Forest pathways to sustainable development*, Rome. P. 1 – 118, (2018).
- [37] F. Filippini, BAIS2: Burned area index for Sentinel-2, *Proceedings*. Vol. 2, №. 364, P. 1-7, (2018).
- [38] H. Gholamrezaie, M. Hasanlou, M. Amani, S.M. Mirmazloumi, Automatic mapping of burned areas using Landsat 8 time series images in Google Earth Engine: A case study from Iran, *Remote Sensing*. Vol. 14(24), (2022).
- [39] L. Giglio, L. Boschetti, D.P. Roy, M.L. Humber, C.O. Justice, The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product, *Remote Sensing of Environment*. Vol. 217, P. 72–85, (2018).
- [40] A. C. Gonçalves, A. Sousa, The Fire in the Mediterranean Region: A Case Study of Forest Fires in Portugal, *Mediterranean Identities – Environment, Society, Culture*. №. 13, P. 305-335, (2017).
- [41] IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In *Climate Change 2013 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change 2014*. Cambridge: *Cambridge University Press*. P. 465-570, (2014).
- [42] S. Saruhan, E. Koç Spatial and statistical analysis of burned areas with Landsat-8/9 and Sentinel-2 satellites: 2023 Çanakkale forest fires. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 34, (2024).
- [43] J. A. Sobrino, R. Llorens, C. Fernández Filgueira, J. M. Fernández-Alonso, J. A. Vega, Methodology for burned areas delimitation and fire severity assessment using Sentinel-2 data. A case study of forest fires occurred in Spain between 2018 and 2023. *Remote Sensing Journal*, (2024).
- [44] N. Abade, A. C.da Costa, F. Moreira, Wildfire burn severity mapping using Sentinel-2 imagery and machine learning algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 293, (2023).
- [45] E. Tercan, U. H. Atasever, Deep learning-based burned forest areas mapping via Sentinel-2 imagery: a comparative study. *Environmental Science and Pollution Research*. Advance online publication, (2023).

