

Evaluating the Effectiveness of Spectral Indices in Assessing Fire Severity Using Google Earth Engine: A Case Study of the Wildfires in Northern Rural Latakia, Syria (July 2025)

Dr .Omar AL KHALIL * 
Dr. Rose Hwaijeh ** 

(Received 20 / 8 / 2025. Accepted 29 / 10 / 2025)

□ ABSTRACT □

This study aimed to assess forest fire severity in northern rural Latakia during July 2025 using five spectral indices: NBR, NBRT, NDVI, NDVIT, and VI6T, before and after the fires, and to relate them to climatic data (temperature and wind speed), utilizing Google Earth Engine for satellite image analysis. Results showed a decrease in mean index values post-fire, e.g., NBR dropped from 0.25 to 0.22 and NBRT from 0.05 to 0.03, reflecting fire impact. Thermal indices NDVIT, NBRT, and VI6T were more sensitive to fire than vegetation indices, especially in affected areas. Fires were mainly located in Qastal Ma‘af, Jabal Turkman, and Nab‘ al-Mar villages. NDVI and NDVIT estimated higher fire-affected areas in some regions due to drought influence. Evaluation results indicated NDVIT and NBRT achieved the highest overall accuracy (0.91) and kappa coefficient (0.82), highlighting their effectiveness. NDVI showed lower accuracy despite higher degraded area estimates. Degraded area estimates by NDVI and NDVIT reached ~21,959 ha (8%), exceeding the 20,000 ha reference by 9.8%, whereas NBR estimated 18,455 ha (7%), and NBRT and VI6T focused on severely burned areas (~13,867 ha, 5%). Correlation analysis indicated temperature was the main driver of fire spread (0.843 with NBR), while wind had less impact, confirming temperature as a key factor in fire dynamics in northern rural Latakia forests.

Keywords Fire severity, spectral indices, Google Earth Engine, temperature, wind speed, spatial distribution.

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

*Professor, Department of Topography, Faculty of Civil Engineering, Latakia University (Formerly Tishreen) , Latakia, Syria. omarmohammedalkhalil@latakia-univ.edu.sy

(**) Work manager, Department of Topographic Engineering, Faculty of Civil Engineering, Latakia University (Formerly Tishreen), Lattakia, Syria. rose.hwaijeh@latakia-univ.edu.sy

تقييم فعالية المؤشرات الطيفية في تقدير شدة الحرائق باستخدام منصة

Google Earth Engine

دراسة حالة حرائق ريف اللاذقية الشمالي، سوريا (تموز 2025)

الدكتور عمر محمد الخليل *

الدكتورة روز موفق حويجة *

(تاریخ الإیداع 20 / 8 / 2025. قبل للنشر في 29 / 10 / 2025)

ملخص □

سعى هذا البحث إلى تقييم شدة حرائق الغابات في ريف اللاذقية الشمالي في شهر تموز 2025 باستخدام خمسة مؤشرات طيفية هي: NBR، NBRT، NDVI، NDVIT، VI6T قبل الحريق وبعد، وربطها بالبيانات المناخية (درجة الحرارة وسرعة الرياح)، عبر منصة Google Earth Engine.

أظهرت النتائج انخفاض القيم المتوسطة للمؤشرات بعد الحريق، مثل تراجع NBR من (0.25 إلى 0.22) و NBRT من (0.05 إلى 0.03)، مما يعكس تأثير النيران. أبدت المؤشرات الحرارية NDVIT، NBRT، VI6T حساسية أكبر مقارنة بالمؤشرات النباتية، خاصة في المناطق المتأثرة.

تمرزت الحرائق في قسطل معاف وجبل التركمان وقرى نبع المر. أظهر NDVIT و NBRT تقديرًا مرتفعاً للحرائق بسبب الجفاف. وحقق NDVIT أعلى دقة كلية (0.91) ومعامل كابا (0.82)، بينما كان أداء NDVI أقل دقة رغم تقديره المرتفع للمساحات المتدهورة.

قدرت NDVIT و NDVI المساحات المتدهورة بـ 21,959 هكتاراً (8%)، متداوza الرقم المرجعي 20,000 هكتار بنسبة 9.8%. في حين قدر NBR مساحة 18,455 هكتاراً (7%) بدقة أكبر، وركز NBRT و VI6T على مناطق شديدة الاحتراق بـ 13,867 هكتاراً (5%).

أظهرت معاملات الارتباط أنَّ درجة الحرارة كانت العامل الأبرز في انتشار الحريق، بارتباط (0.843) مع NBR، فيما كان تأثير الرياح أقل. مؤكدةً دور الحرارة في ديناميكية حرائق غابات ريف اللاذقية الشمالي.

الكلمات المفتاحية: شدة الحريق، المؤشرات الطيفية، منصة Google Earth Engine، درجة الحرارة، سرعة الرياح، التوزيع المكاني.



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

* أستاذ . قسم الهندسة الطبوغرافية . كلية الهندسة المدنية . جامعة اللاذقية (تشرين سابقًا) . اللاذقية . سوريا.

. <https://orcid.org/0009-0001-8216-3852> omarmohammedalkhalil@latakia-univ.edu.sy

* مدير أعمال . قسم الهندسة الطبوغرافية . كلية الهندسة المدنية . جامعة اللاذقية (تشرين سابقًا) . اللاذقية . سوريا.

. <https://orcid.org/0009-0008-8866-2004> rose.hwijeh@latakia-univ.edu.sy

مقدمة:

تُعد حرائق الغابات من أبرز العوامل الطبيعية التي تؤثر على النظم البيئية، إذ تلعب دوراً طوياً الأمد في تشكيل توبيخات المناظر الطبيعية وتنظيم العمليات البيئية، من خلال تأثيرها المباشر على توزيع الغطاء النباتي وبنائه الفيزيائي [1-2]. ويمكن للحرائق واسعة النطاق أن تحدث اضطرابات في الدورات المناخية على مستوى الكره الأرضية [3]، في حين تُسهم على مستوى البيئة المحلية في تعديل بنية المجتمع النباتي عبر إزالة طبقات الغطاء النباتي كلياً أو جزئياً، مما ينعكس على الأنماط النباتية بشكل مباشر [4-6]. إنَّ تقدير آثار حرائق الغابات يُعد أمراً جوهرياً من أجل اختيار التدخل المناسب بعد الحريق [7]، وتوجيه جهود المراقبة والتخطيط لعمليات استعادة الغطاء النباتي [8]، وتوفير خطوط أساس موثوقة لإدارة الموارد البيئية على المدى الطويل [9].

لقد أتاح التقدم في تقنيات نظم المعلومات الجغرافية [10] والاستشعار عن بعد استخدام أجهزة الاستشعار الفعالة المختلفة، من بينها تحليل المجز الطيفي والمحاكاة واستخدام المؤشرات الطيفية Spectral indices [11]، تعتمد هذه المؤشرات غالباً على دمج الانعكاسات في الأطيف المرئية والقريبة من تحت الحمراء وتحت الحمراء المتوسطة، وهي نطاقات طيفية شديدة الحساسية للتغيرات التي تسببها الحرائق في خصائص التربة والنبات، مثل لون التربة وتركيبها ورطوبتها ومحتوى الكلوروفيل [12-13]. وقد تم اختبار فعالية هذه المؤشرات الطيفية بشكل واسع في عدة أنظمة بيئية حول العالم، مثل الغابات الشمالية، والغابات المعتدلة ذات الأوراق العريضة، والغابات المتوسطية [14-15]، ومن بين أبرز هذه المؤشرات، تعد قرينة التغيرات النباتية – Normalized Difference Vegetation Index – NDVI من أكثر الأدوات استخداماً لتقدير شدة الحريق، سواء باستخدام صور ما بعد الحريق فقط أو بمقارنة الصور قبل وبعد الحريق [16-17]، كما تعد قرينة تغيرات الحروق Normalized Burn Ratio – NBR من الأدوات الفعالة لتصنيف درجات شدة الحريق تحت ظروف بيئية مختلفة [18-19]، فعلى سبيل المثال، أظهرت دراسة Epting وزملاؤه في ألاسكا فعالية مؤشر NBR في تمثيل الأضرار الأرضية بعد مقارنة 13 مؤشراً مختلفاً، حيث جاء مؤشر NBR في المرتبة الأولى من حيث قوة العلاقة مع البيانات الحقلية، تلاه مؤشر الفرق الطيفي الزمني dNBR [20]، وفي مراجعة شاملة أجراها French وآخرون [21]، تم توثيق 41 دراسة استخدمت بيانات الأقمار الصناعية متوسطة إلى منخفضة الدقة المكانية Spatial resolution لتقدير شدة الحريق عبر استخدام NBR و dNBR منها 26 دراسة استخدمت صور Landsat بنجاح لاشتقاق خرائط شدة الحريق. وقد تم اعتماد مؤشر NBR المشتق من Burned Area Emergency Rehabilitation (BAER) ضمن النظام التشغيلي في الولايات المتحدة عبر برنامج (BAER)، لكن بالرغم من فعالية هذه المؤشرات، فقد أظهرت الدراسات أن أداء مؤشر NBR يختلف باختلاف الأقاليم البيئية وأنواع الغطاء النباتي [22-24]، ما يوجب ضرورة اختباره في بيئات جديدة وغير مدروسة بشكل كافٍ، مثل الغابات المتوسطية دائمة الخضرة [25-26]، كما أن العلاقة بين المؤشرات الطيفية وصفات استجابة النباتات للحريق، وكذلك تجدها بعد الحريق، ما زالت غير مفهومة بالكامل، وهناك حاجة متزايدة لفهم مدى فعالية دمج النطاقات الحرارية في تحسين التمييز بين درجات شدة الحريق في أنظمة بيئية مختلفة [27-28].

يتناول هذا البحث مشكلة تقييم شدة حريق الغابات في ريف اللاذقية الشمالي في محافظة اللاذقية من خلال استخدام مؤشرات طيفية معتمدة على صور الأقمار الصناعية قبل وبعد الحريق، وذلك في ظل الحاجة إلى أدوات دقيقة

وفعالة لرصد وتقييم الأضرار الناجمة عن الكوارث الطبيعية. تسعى هذه الدراسة للإجابة على عدد من الأسئلة البحثية، أبرزها: ما مدى فعالية المؤشرات الطيفية في تقدير شدة الحرائق؟ وكيف تختلف الاستجابات الطيفية للمؤشرات نتيجة الحرائق؟ في هذا السياق، تهدف هذه الدراسة إلى تقييم فعالية مجموعة من المؤشرات الطيفية المشقة من صور الأقمار الصناعية في تقدير شدة الحرائق التي اجتاحت ريف اللاذقية الشمالي، سوريا، خلال الفترة من 3 إلى 13 تموز/2025، حيث تم تحديد فترة ما قبل الحرائق على أنها الشهر السابق مباشرةً لبداية الحرائق محل الدراسة وستقتيد الدراسة من منصة Google Earth Engine بوصفها أداة تحليلية متقدمة لمعالجة البيانات الفضائية بفعالية عالية، بما يتيح مقارنة الأداء بين خمسة مؤشرات رئيسية هي: قرينة تغيرات الحرائق NBR، القرينة الحرارية لتغيرات الحرائق NBRT – Normalized Burn Ratio Thermal، قرينة التغيرات النباتية NDVI، قرينة تغيرات الحرائق النباتية NDVIT – Normalized Difference Vegetation Index Thermal، قرينة التباين الحرارية الساسنة VI6T – Vegetation Index 6 Thermal، واختبار قدرة كل منها على تمثيل التباين المكاني في شدة الحرائق. يوفر البحث نموذجاً يمكن تعديله على مناطق أخرى تعاني من ظاهرة حرائق الغابات، مما يعزز من فعالية جهود الرصد البيئي وإعادة تأهيل النظم البيئية المتضررة.

أهمية البحث وأهدافه:

تبعد أهمية الدراسة من تركيزها على مقارنة خمسة مؤشرات طيفية هي NBR، NBRT، NDVI، NDVIT، VI6T واستكشاف قدرتها في تمثيل شدة الحرائق، إلى جانب دراسة أثر دمج البيانات الحرارية في تحسين دقة التقدير.

يهدف البحث إلى:

- حساب القيم الزمنية (قبل وبعد الحرائق) للمؤشرات الطيفية NBR، NBRT، NDVI، NDVIT، VI6T.
- اشتقاق خرائط شدة الحرائق لكل مؤشر من خلال حساب الفرق الطيفي بين الصور قبل وبعد الحرائق وتقييم دقة هذه الخرائط من خلال مقارنتها بصورة مرجعية عالية الدقة تغطي منطقة الدراسة بعد الحرائق.
- تحديد أكثر المناطق تضرراً ضمن ريف اللاذقية الشمالي خلال فترة الحرائق باستخدام البيانات الطيفية.
- تحليل العلاقة بين بعض المتغيرات المناخية اليومية وشدة الحرائق أثناء فترة الدراسة.
- استكشاف قدرات منصة Google Earth Engine في معالجة وتحليل صور الأقمار الصناعية المتعلقة بالحرائق.

طريق البحث ومواده:

1- منطقة الدراسة

منطقة الدراسة هي محافظة اللاذقية، التي تقع في الساحل الغربي لسوريا بين خطى طول (35.7° , 36.3°) شرق خط غرينتش، وبين دائري عرض (35.3° , 35.9°) شمال خط الاستواء (الشكل (1)), وتحده من أقصى المناطق السورية بالتنوع البيئي والطبيعي. تتميز المحافظة بتضاريسها المتنوعة التي تشمل السهول الساحلية، والتلال، والجبال التي تغطيها غابات كثيفة، خاصة في ريفها الشمالي، مثل مناطق صلحفة وكسب والقرداحة. تُعد هذه الغابات من النوع المتوسطي، وتحتوي على أشجار دائمة الخضرة وأخرى نفضية مثل السنديان، البلوط، والصنوبر، وهي تلعب

دوراً مهماً في التوازن البيئي ومكافحة التغير المناخي. كما يسود المحافظة مناخ متوسطي معتدل، ما يجعلها عرضة لخطر اندلاع الحرائق في فصل الصيف، خاصة عند توافر ظروف مثل ارتفاع درجات الحرارة، الجفاف، والرياح القوية.

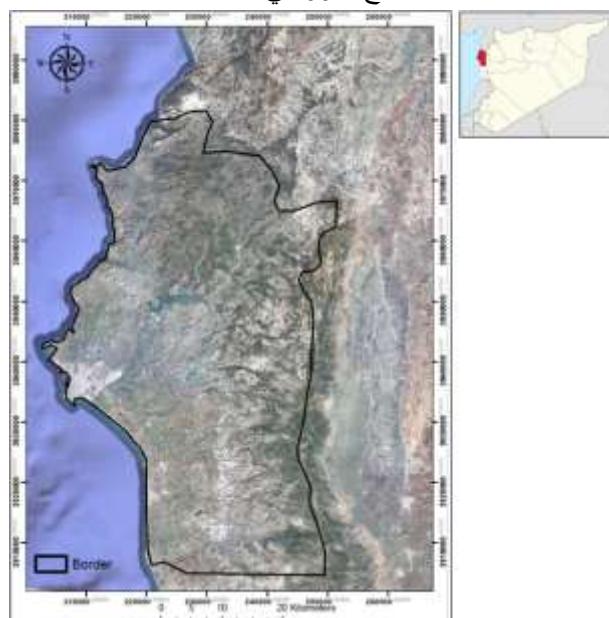
2- مصطلحات الدراسة

2-1- حرائق الغابات

تشير حرائق الغابات Forest Fires / Wildfires إلى اندلاع النار في المناطق الطبيعية كالغطاء الغابي، الأرضي العشبية، وشبه الصحراوية. تمثل هذه الظاهرة عملاً مزدوج الأثر؛ إذ تسبب فقدان التنوع الحيوي وتدهور التربة، لكنها في الوقت نفسه جزء من الدورة الطبيعية لتجديد النظم البيئية [29]. قد تكون الحرائق طبيعية أو بشريّة المصدر، ويتأثر اندلاعها وانتشارها بالمناخ، الغطاء النباتي، والتضاريس [31-30]. تزايدت شدتها وتكرارها مؤخراً بفعل التغييرات المناخية، مما ضاعف آثارها البيئية والاقتصادية والاجتماعية [27]. تؤدي إلى إزالة الغطاء النباتي وتغيير تركيب الأنواع [32-33]، وتدهور التربة عبر تقليل قدرتها على الاحتفاظ بالماء وزيادة خطر الانجراف [34]. كما تسهم في إطلاق الغازات الدفيئة وتعزيز الاحتباس الحراري [36-35]. من هنا تبرز أهمية تقييم شدتها باستخدام تقنيات الاستشعار عن بعد، خصوصاً المؤشرات الطيفية، لسرعة ودقة رصد تأثيراتها في البيئات الصعبة.[37]

2-2- الغطاء النباتي

يُعد الغطاء النباتي Vegetation Cover عنصراً أساسياً لاستقرار النظم البيئية عبر تنظيم الحرارة والرطوبة، تثبيت التربة، تحسين الهواء، ودعم التنوع البيولوجي ودورة الكربون. إلا أنه يتعرض للتغيرات نتيجة العوامل الطبيعية والبشرية، وتُعد الحرائق من أبرز مسببات تدميره، حيث تقلل من المساحات النباتية وتغير توزيع الأنواع وخصائصها الفيزيولوجية [38-39]. كما تحدث تغيرات في بنية التربة تعيق تجدد النباتات طبيعياً [40-41-42]. لذلك يعد رصد حالة الغطاء النباتي بعد الحرائق ضرورياً، وتعتمد الدراسات الحديثة على الاستشعار عن بعد لرصد التغيرات بدقة وسرعة وعلى نطاق واسع، مما يساعد الباحثين وصناع القرار في التخطيط لاستعادته.



الشكل (1). منطقة الدراسة.

2-3- المؤشرات الطيفية

تُستخدم المؤشرات الطيفية *Spectral Indices* في تحليل بيانات الأقمار الصناعية لرصد التغيرات على سطح الأرض بالاعتماد على الانعكاسات في نطاقات مختلفة من الطيف الكهرومغناطيسي (المريء، تحت الحمراء القريبة، والمتوسطة)، وهي حساسة للتغيرات التي تحدثها الحرائق في خصائص التربة والنبات [11-43]. وتتميز بقدرها السريعة والفعالة على تقييم شدة الحرائق عبر المقارنة بين صور ما قبل الحرائق وبعده [16]. المؤشرات الرئيسية المستخدمة في هذا البحث هي:

- **NBR:** يعتمد على النطاقين NIR و SWIR2 من صور Sentinel-2، ويُعد المؤشر الأساسي لاكتشاف آثار الحرائق وشديتها [44].
- **NBRT:** تعديل لمؤشر NBR يدمج حرارة سطح الأرض لتحسين التقدير خاصة في الظروف المتغيرة [45].
- **NDVI:** يقيس حالة الغطاء النباتي وخسارته بعد الحرائق بالاعتماد على الفرق بين NIR و RED [46].
- **NDVIT:** تعديل لمؤشر NDVI يضيف بيانات حرارة سطح الأرض لرصد الإجهاد الحراري للنباتات [47].
- **VI6T:** يجمع بين انعكاسات NIR و حرارة سطح الأرض لرصد حالة الغطاء النباتي والإجهاد الحراري بشكل متزامن [48].

ويُعرض في الجدول (1) ملخص لهذه المؤشرات وصيغ حسابها.

الجدول (1). المؤشرات الطيفية المستخدمة في البحث.

المؤشر الطيفي	الغرض	الصيغة
NBR	المعيار الأساسي لاكتشاف آثار الحرائق وتقدير شدة الحرائق.	(NIR – SWIR2) / (NIR + SWIR2)
NBRT	تحسين مؤشر الحروق بإدماج تأثير حرارة سطح الأرض.	(NIR – SWIR2×TIR) / (NIR + SWIR2×TIR)
NDVI	تقييم خسارة الغطاء النباتي نتيجة الحرائق.	(NIR – RED) / (NIR + RED)
NDVIT	دمج الاستجابة الحرارية مع الإجهاد النباتي.	(NIR – RED×TIR) / (NIR + RED×TIR)
VI6T	يعكس حالة الغطاء النباتي والإجهاد الحراري بشكل متزامن.	(NIR – TIR) / (NIR + TIR)

Red (Near Infrared) هي الأشعة تحت الحمراء القريبة، SWIR2 (Shortwave Infrared 2) هي الأشعة تحت الحمراء قصيرة الموجة الثانية، NIR (Thermal Infrared) هي الأشعة تحت الحمراء الحرارية. Band (Band) هي الحزمة الحمراء، و TIR (TIR) هي الأشعة تحت الحمراء الحرارية.

4-2- المنصة Google Earth Engine (GEE)

هي منصة حوبية سحابية مقدمة تسمح بتحليل ومعالجة كميات ضخمة من بيانات الأقمار الصناعية والبيانات الجغرافية المكانية بسرعة وكفاءة عالية، دون الحاجة إلى موارد حوبية محلية مكلفة [49-50]، تستخدم هذه المنصة على نطاق واسع في الدراسات البيئية والاستشعار عن بعد، حيث توفر مكتبات وأدوات مبرمجة بلغة JavaScript و Python لمعالجة الأكواد باستخدام بنية MapReduce، مما يتيح للمستخدمين إجراء تحليل زمني مكاني معقد، وإنشاء خرائط ومحططات بسهولة. في هذا البحث، استخدمت المنصة GEE لمعالجة صور Sentinel-2 ورصد شدة حرائق الغابات في ريف اللاذقية الشمالي، ومقارنة أداء المؤشرات الطيفية الخمسة في تقييم درجات الحرائق.

3- منهجية الدراسة

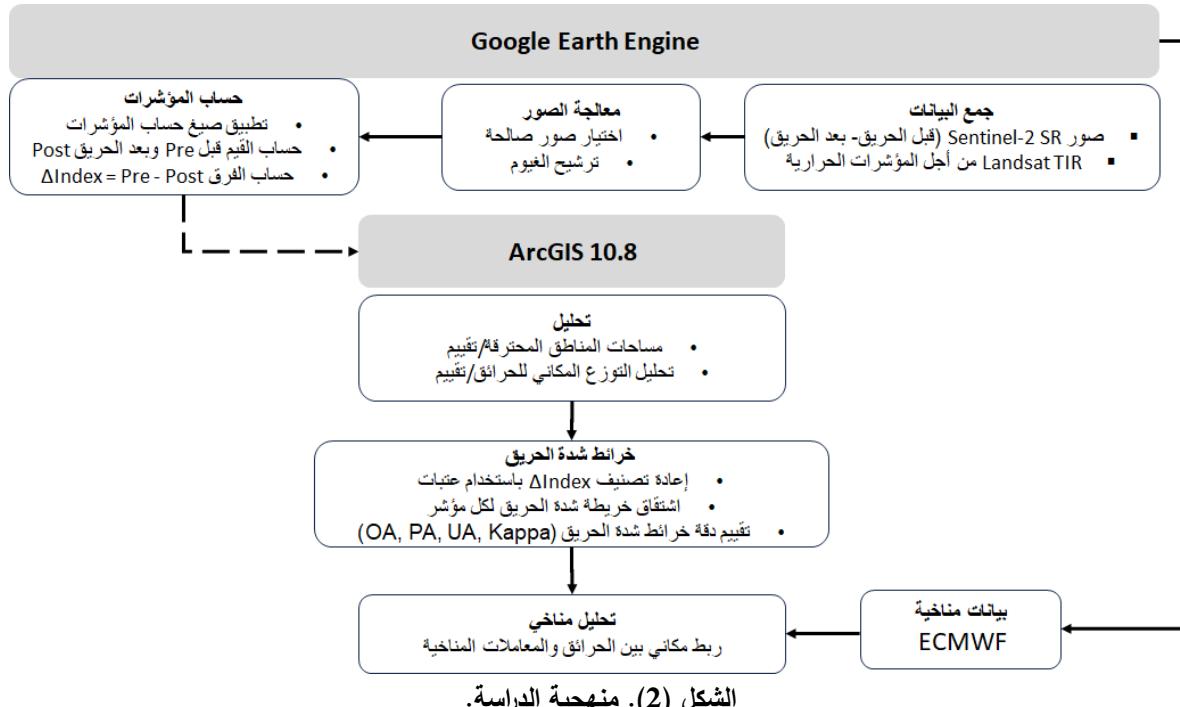
اعتمدت هذه الدراسة على المنهج التجريبي من خلال استقصاء العلاقة بين نوع المؤشر الطيفي ومدى فعاليته في تمثيل شدة الحرائق في منطقة ريف اللاذقية الشمالي (الشكل (2)). تم التركيز على خمسة مؤشرات طيفية هي NBR،

VI6T، NDVIT، NBRT، NDVI، GEE. اعتمدت الدراسة على تطبيق مؤشرات طيفية على البيانات الفضائية متعددة المصادر باستخدام منصة Google Earth Engine (GEE)، لما توفره من قدرة عالية على الوصول إلى أرشيف صور الأقمار الصناعية ومعالجتها بسرعة وكفاءة. تم تحميل صور الأقمار الصناعية 2-Sentinel للفترة التي سبقت الحريق (قبل 3 تموز 2025) وتلك التي تلته (بعد 13 تموز 2025)، من أجل تحليل تأثير حرائق الغابات التي اندلعت في ريف اللاذقية الشمالي. وتحتاج صور SR-2 Sentinel مناسبة جدًا لهذا النوع من التحليل نظرًا لدققتها المكانية العالية (10 إلى 20 م) وتكرار مرورها الزمني المناسب (5 أيام)، بالإضافة إلى توفر نطاقات طيفية ملائمة لحساب المؤشرات البيئية، وعلى رأسها مؤشر الفرق المعياري للحرائق NBR. جرى تصفية الصور لاختيار تلك ذات التغطية الساحابية المنخفضة، فقد تمت معالجة الصور لاختيار تلك التي تحتوي على أقل قدر ممكن من الغطاء السحابي، وذلك لضمان دقة القيم الطيفية للمؤشرات المستخدمة. كما تم الاستفادة من نطاق الأشعة تحت الحمراء الحرارية (TIR) الموجود في القمر الصناعي Landsat، لاحتساب المؤشرات الحرارية NBRT و NDVIT و VI6T. تم بعد ذلك استخدام لغة JavaScript ضمن منصة GEE لحساب القيم الزمنية (قبل وبعد الحريق) للمؤشرات الخمسة، بناءً على المعادلات الطيفية الموضحة في الجدول (1)، وتم حساب الفرق الطيفي لكل مؤشر عبر طرح قيم ما بعد الحريق من القيم السابقة له ($dIndex = Index_pre - Index_post$) لتقدير التغيرات الناتجة عن الحريق، ثم إعادة تصنيف النتائج إلى درجات لشدة الحريق باستخدام قيم عتبية مناسبة من التوزيع الإحصائي للبيانات. تم تحويل المؤشرات وخرائط شدة الحريق إلى خرائط TIFF وتصديرها لتحليلها داخل بيئة ArcGIS 10.8 والقيام بتقسيم دقة خرائط شدة الحريق الناتجة من خلال مقارنة تصنيفاتها بصورة 2-Sentinel باستخدام منهجية كمية تعتمد على نقاط تقسيم موزعة بشكل مدرس ومؤشرات دقة إحصائية (الدقة الكلية، دقة المنتج، دقة المستخدم، ومعامل كابا). تم حساب بحسب المساحات الكلية المحترقة، وتحليل التوزيع المكاني لتحديد المناطق الأكثر تضررًا في ريف اللاذقية. في هذا السياق، اعتمد البحث على تقارير وزارة الزراعة السورية كمصدر رسمي لتقديرات المساحات المحترقة وتوزيع الحرائق في المنطقة. وأخيرًا، تم جمع بيانات مناخية يومية (درجة الحرارة، سرعة الرياح والمطر المطري) خلال فترة الدراسة من مصادر رسمية، وربطها مكانيًا مع خرائط شدة الحريق باستخدام أدوات التحليل المكاني لتحديد مدى مساهمة الظروف المناخية في تفاقم شدة الحريق. في الواقع، تم الاعتماد على بيانات المركز الأوروبي للتنبؤات الجوية متوسطة المدى (ECMWF) للحصول على المعلومات المناخية اليومية لمنطقة ريف اللاذقية الشمالي خلال فترة الحرائق (13-3 تموز 2025)، حيث تم تحميل بيانات كل من درجة الحرارة، سرعة الرياح، والمطر المطري، نظرًا لما تتميز به قاعدة بيانات ECMWF من دقة مكانية تبلغ حوالي 10×10 كيلومتر لكل خلية ودقة زمنية تساوي يومًا واحدًا، واعتمادها على نماذج عددية موثوقة تغطي الكره الأرضية. تم استدعاء هذه البيانات من خلال منصة Google Earth Engine (GEE)، باستخدام مجموعة البيانات المناخية المعالجة من ECMWF والمخزنة ضمن مشروع ERA5-Land، والتي توفر قيمًا مناخية يومية بدقة تصل إلى 0.1 درجة (~10 كم).

النتائج والمناقشة:

1- تحليل المؤشرات الطيفية قبل وبعد الحريق

باستخدام الكود المطور داخل GEE تم حساب القيم الزمنية للمؤشرات الطيفية الخمسة (NBRT، NBR، NDVI، NDVIT، VI6T) لفترتي ما قبل الحريق (قبل 3 تموز 2025) وما بعد الحريق (بعد 13 تموز 2025) ضمن منطقة ريف اللاذقية الشمالي. خرائط هذه المؤشرات موضحة في الأشكال من 3 إلى 12.



تم بعد ذلك اشتقاق القيم الإحصائية للمؤشرات الطيفية قبل وبعد الحرائق وهي موضحة في الجدولين (3) و (4). توضح الجداول (3) و (4) التغيرات الإحصائية في القيم الدنيا (Min)، والمتوسطة (Mean)، والمتوسطة (Max)، والعظمى (Max) للمؤشرات المدروسة قبل وبعد الحرائق في منطقة ريف اللاذقية الشمالي.

الجدول (3). القيم الإحصائية للمؤشرات قبل الحرائق.

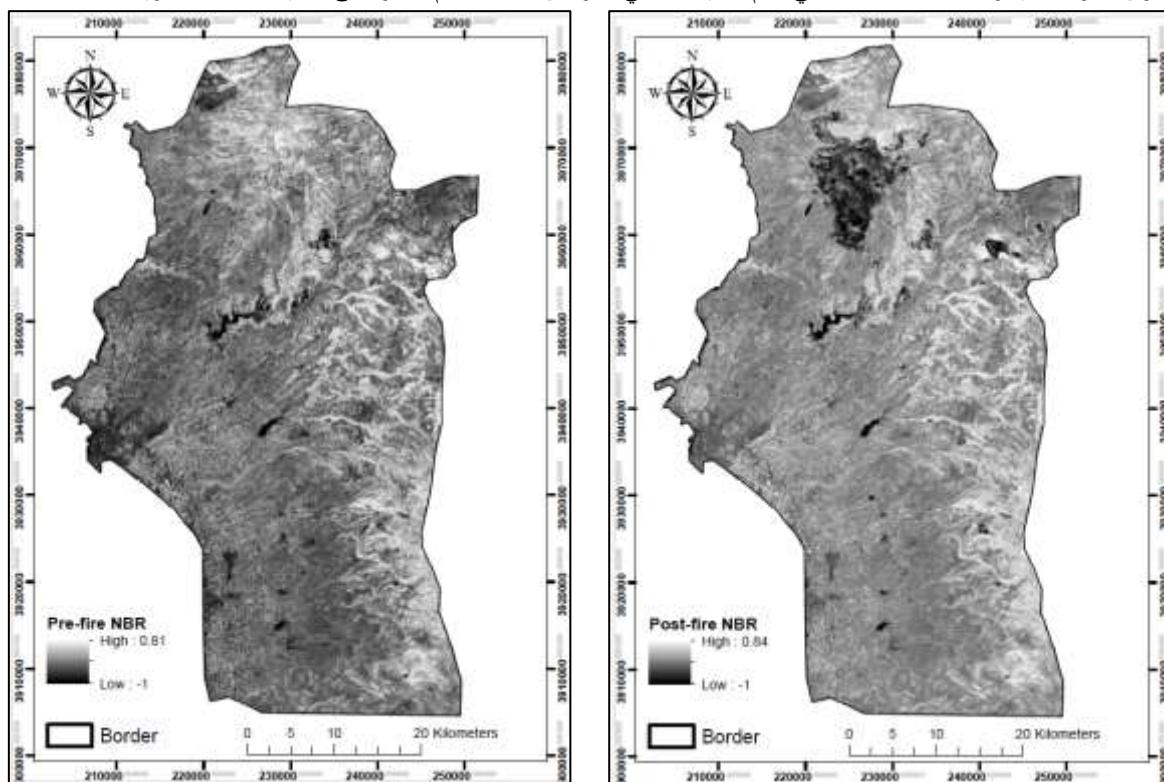
المؤشر الطيفي	Min	Mean	Max
NBR	-1.00	0.25	0.81
NBRT	-1.00	0.05	0.77
NDVI	-1.00	0.47	1.00
NDVIT	-1.00	0.47	1.00
VI6T	-1.00	0.05	0.77

الجدول (4). القيم الإحصائية للمؤشرات بعد الحرائق.

المؤشر الطيفي	Min	Mean	Max
NBR	-1.00	0.22	0.84
NBRT	-1.00	0.03	0.79
NDVI	-1.00	0.43	1.00
NDVIT	-1.00	0.43	1.00
VI6T	-1.00	0.03	0.79

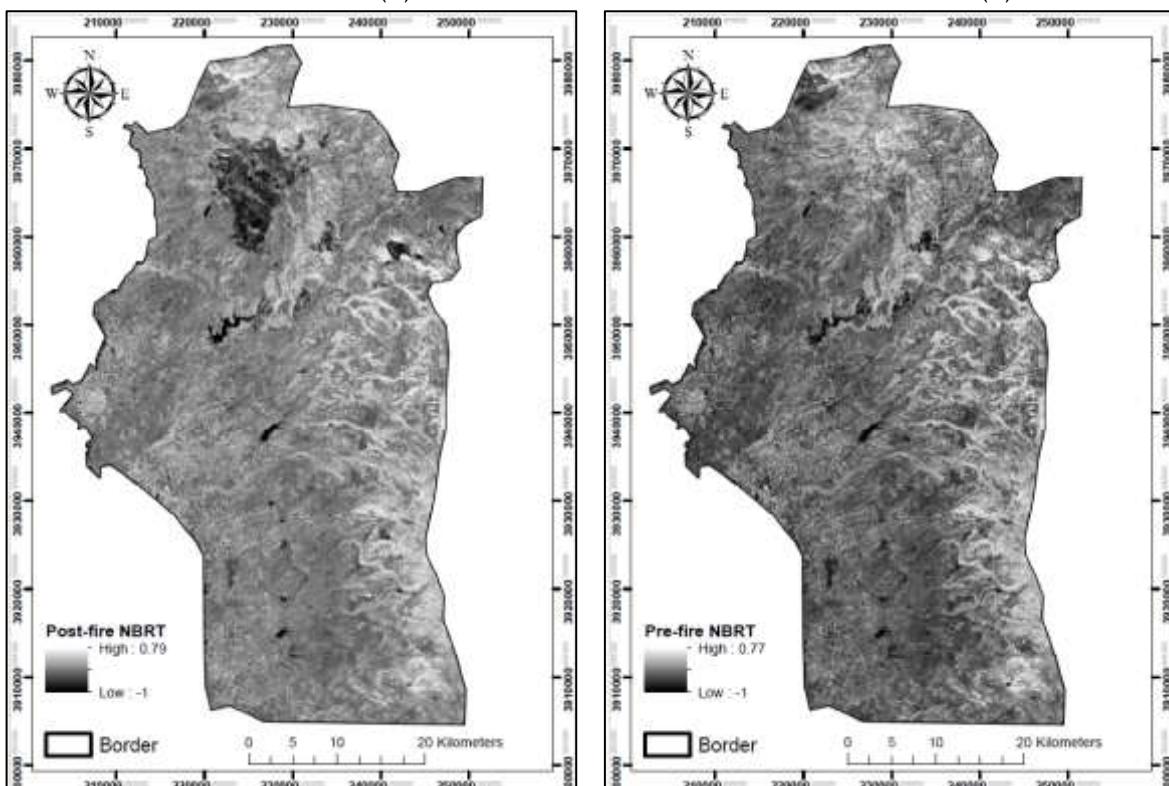
يُلاحظ بشكل عام أن جميع المؤشرات شهدت انخفاضاً طفيفاً في القيمة المتوسطة بعد الحرائق، مما يعكس التأثير المباشر للنيران على الغطاء النباتي. فعلى سبيل المثال، انخفض متوسط مؤشر NBR من 0.25 قبل الحرائق إلى 0.22 بعده، ومؤشر NBRT من 0.05 إلى 0.03، بينما سجل مؤشر NDVI انخفاضاً من 0.47 إلى 0.43، وهو ما ينطبق أيضاً على NDVIT. كذلك انخفض متوسط VI6T بنفس النسبة تقريباً. وتشير هذه النتائج إلى أن المؤشرات

المستندة إلى دمج بيانات الحرارة (مثل NBRT و VI6T و NDVIT) أظهرت استجابة أكثر حساسية للتغير الناجم عن الحرائق مقارنة بالمؤشرات التقليدية، لا سيما في القيم المتوسطة التي تغير عن الاتجاه العام للتغير على مستوى المنطقة المدروسة.



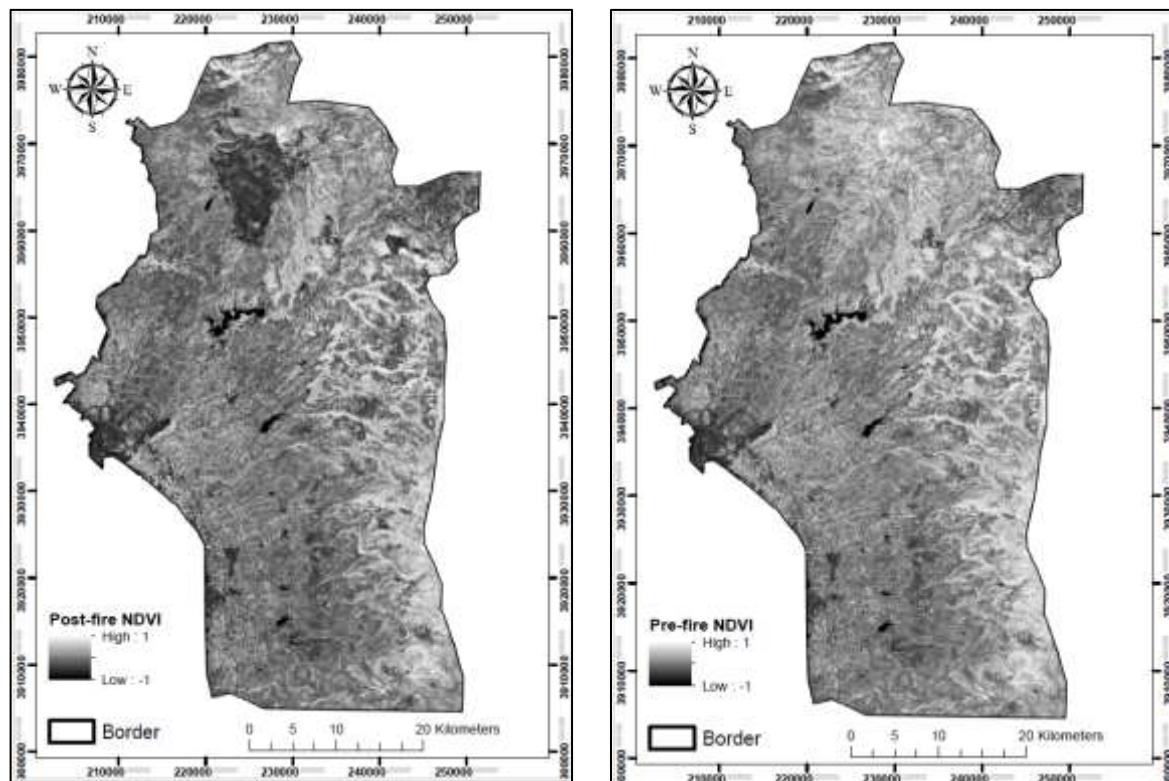
الشكل (4). المؤشر NBR قبل الحرائق

الشكل (3). المؤشر NBR بعد الحرائق



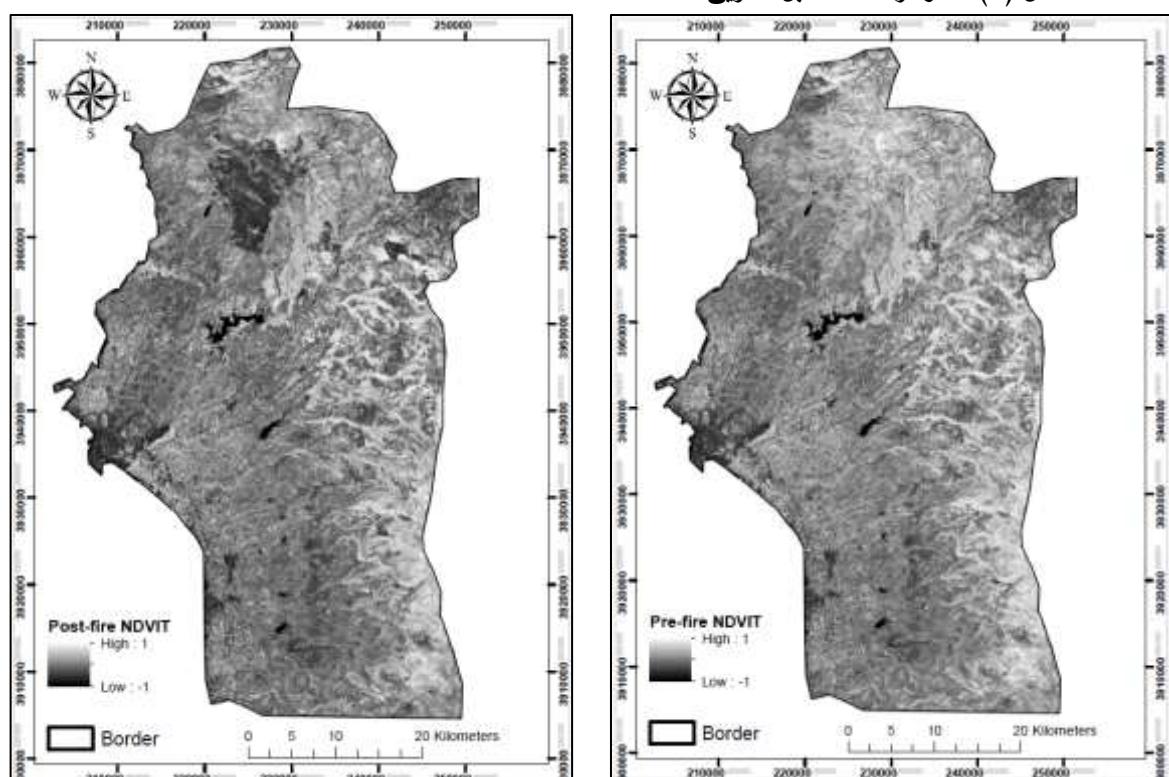
الشكل (6). المؤشر NBRT بعد الحرائق

الشكل (5). المؤشر NBRT قبل الحرائق



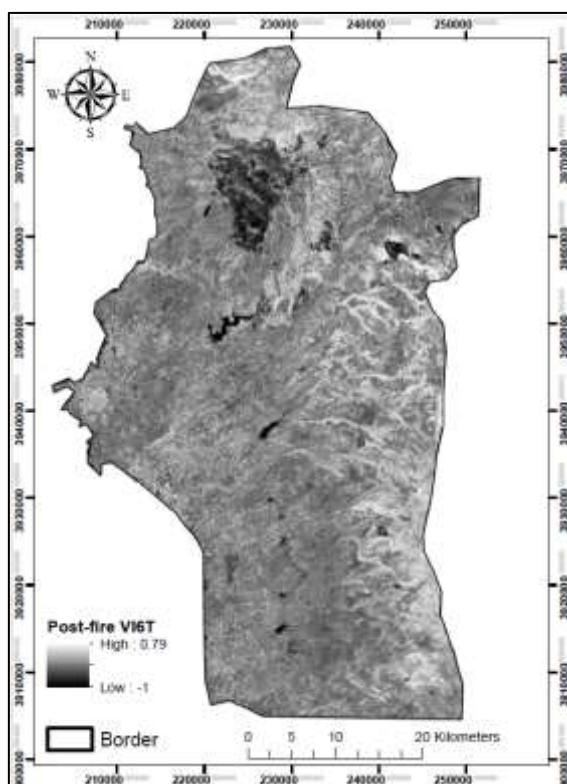
الشكل (8). المؤشر NDVI بعد الحريق

الشكل (7). المؤشر NDVI قبل الحريق

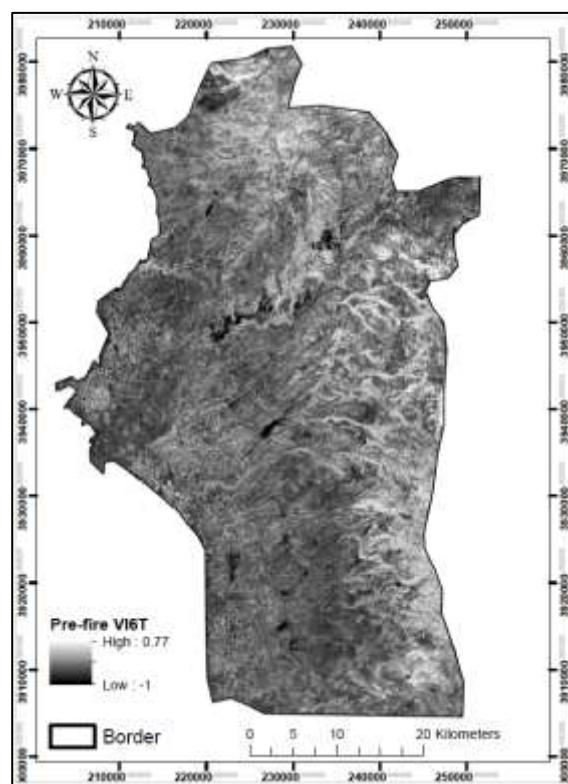


الشكل (10). المؤشر NDVIT بعد الحريق

الشكل (9). المؤشر NDVIT قبل الحريق



الشكل (12). المؤشر VI6T بعد الحريق



الشكل (11). المؤشر VI6T قبل الحريق

ورغم بقاء القيم الدنيا ثابتة عند 1- في جميع المؤشرات (وهو متوقع بسبب وجود مناطق مظللة أو مائية أو خارج مجال البيانات)، إلا أن تغير المتوسط هو المؤشر الأهم حيث يمكن استخدامه كمؤشر غير مباشر لتقدير شدة التأثير. من ناحية أخرى، يمكن تحليل الجداول (3 و 4) بالاعتماد على الفروق الإحصائية البسيطة في المتوسط بين ما قبل الحريق وما بعده، باعتبار أن المتوسط هو أكثر القيم دلالة في وصف السلوك العام للمؤشر، كما في الجدول (5). نلاحظ من الجدول (5) أن جميع المؤشرات الطيفية المستخدمة قد أظهرت انخفاضاً طفيفاً بعد الحريق، إلا أن حجم هذا الانخفاض تفاوت بينها، حيث سُجل أكبر فرق في مؤشر NDVIT و مؤشر NDVI، مما يشير إلى حساسيتها العالية للتغيرات المرتبطة بالنباتات، وبالتالي قدرتها الأفضل على رصد آثار الاحتراق. في المقابل، كانت الفروقات في مؤشرات NBR و NBRT أقل وضوحاً، وهو ما قد يعزى إلى تأثيرها بعوامل أخرى غير الحريق أو ضعف حساسيتها في هذا السياق البيئي.

الجدول (5). فروقات المتوسطات للمؤشرات قبل وبعد الحريق

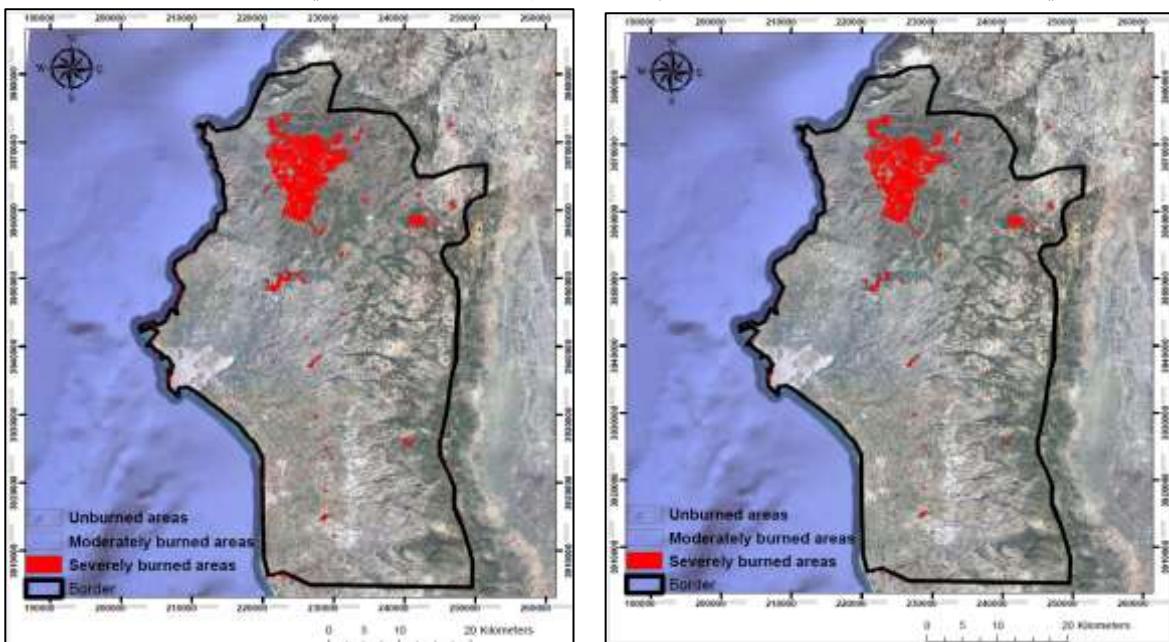
المؤشر الطيفي	المتوسط قبل الحريق	المتوسط بعد الحريق	الفرق (Δ)
NBR	0.25	0.22	-0.03
NBRT	0.05	0.03	-0.02
NDVI	0.47	0.43	-0.04
NDVIT	0.47	0.43	-0.04
VI6T	0.05	0.03	-0.02

على الرغم من وجود تناقض ظاهري بين التحليلين السابقين، حيث أظهر التحليل الأول أنَّ مؤشرات NBRT و NDVIT و VI6T هي الأكثر حساسية بعد الحريق استناداً إلى متوسط القيمة، بينما أشار التحليل الثاني إلى أنَّ

NDVI و NDVIT هما الأكثر حساسية استناداً إلى فرق القيمة الكلية، إلا أن هذا التناقض ليس فعلياً عند التعمق في تفسير النتائج:

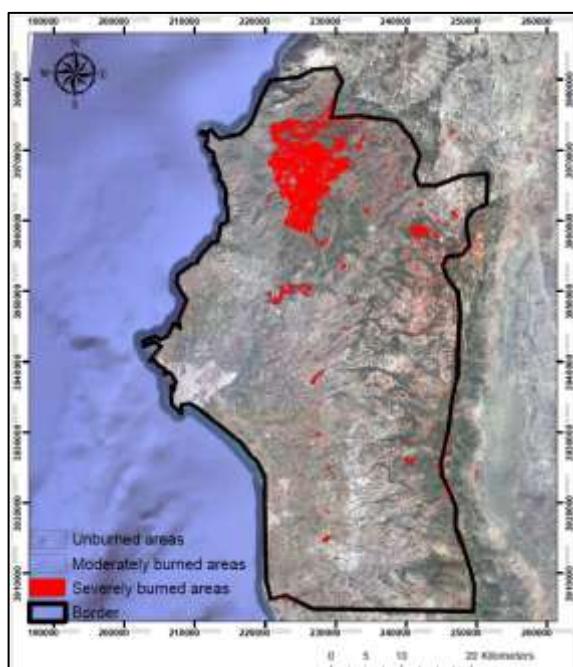
أولاً: يتبيّن أن مؤشر NDVIT يُظهر حساسية عالية في كلا التحليلين، مما يدل على ثبات أدائه وقوته في تمثيل التغييرات الناتجة عن الحريق. ثانياً، يُعد مؤشر NDVI حساساً من حيث فرق القيمة، أي أنه يستجيب بسرعة للتغير في بعض الواقع، لكنه لا يُظهر تغييراً متوسطاً كبيراً على مستوى المنطقة ككل، مما يفسر انخفاض متوسطه بعد الحريق. ثالثاً، تُظهر المؤشرات الحرارية مثل VI6T و NBRT تغييراً واضحاً في المتوسط دون أن تُظهر بالضرورة فروقات كبيرة في القيم القصوى أو الدنيا، مما يعكس تأثيراً عاماً أكثر استقراراً وانتشاراً في المنطقة المحرّفة.

فيما يخص التوزيع المكاني للحرائق فقد تم اشتقاء خرائط الفروق الطيفية لكل مؤشر وهي موضحة في الأشكال من 13 إلى 17. توضح هذه الخرائط أصناف المناطق من حيث شدة الاحتراق وهذه الأصناف هي: مناطق غير محترقة Unburned areas، مناطق متوسطة الاحتراق Moderately burned areas، ومناطق شديد الاحتراق Severely burned areas. كشفت خرائط شدة الحريق الناتجة عن كل المؤشرات المدروسة عن نمط مكاني متجانس لمناطق الحرائق، مع تركيز واضح في المناطق المعروفة بحرائقها الشديدة مثل غابات قسطل معاف وجبل التركمان وقرى نبع المر. ولكن بالمقابل، أظهرت مؤشرات NDVIT و NDVI وجود مناطق يفترض أنها شديدة الاحتراق، غير أن هذه المناطق لم تُسجل نفس الدرجة من الشدة عند تحليلها ببقية المؤشرات، مما يشير إلى تباين في الاستجابة بين المؤشرات. يمكن تفسير هذا التباين بوجود عوامل بيئية أخرى غير الحريق أثرت على الغطاء النباتي، وعلى رأسها الجفاف وانخفاض معدلات الهطول المطري خلال فصل الشتاء. في مثل هذه الحالات، يتدحرج الغطاء النباتي طبيعياً بسبب نقص الرطوبة، فتسجل مؤشرات مثل NDVIT و NDVI انخفاضاً في القيم، ما قد يفهم خطأ على أنه ناتج عن حريق. هذا التراجع في الكثافة النباتية لا يعكس بالضرورة تأثير الحريق بل قد يكون نتيجة لظروف مناخية قاسية أدت إلى تدهور الغطاء النباتي بشكل تدريجي وعلى مساحة واسعة. لذا، فإن الاعتماد الحصري على مؤشرات الغطاء النباتي دون مراعاة الظروف المناخية قد يؤدي إلى تضخيم تقدير شدة الحريق في بعض المناطق.

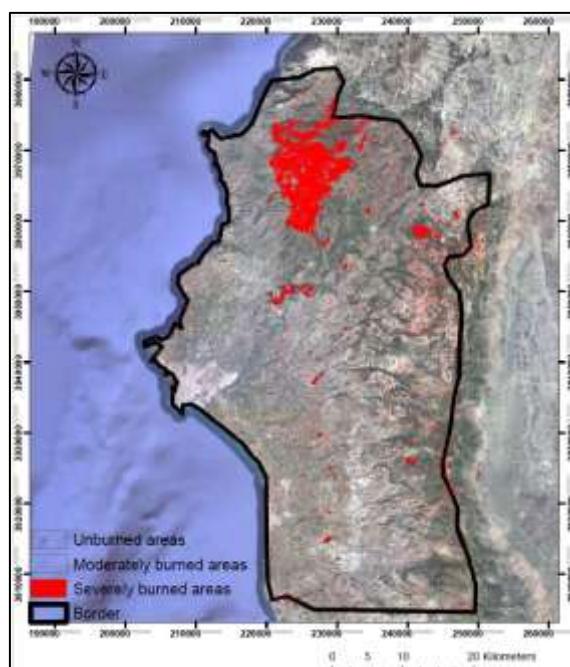


الشكل (14). شدة الحريق وفق NBRT

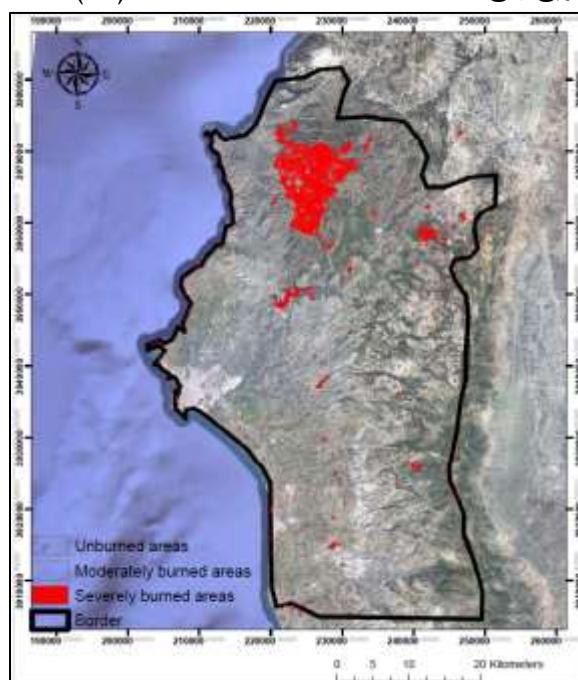
الشكل (13). شدة الحريق وفق NBR



الشكل (16). شدة الحرائق وفق NDVIT



الشكل (15). شدة الحرائق وفق NDVI



الشكل (17). شدة الحرائق وفق VI6T

2- تقييم دقة خرائط شدة الحرائق

لتقييم دقة خرائط شدة الحرائق الناتجة عن تطبيق المؤشرات الطيفية الخمسة NBR، NBRT، NDVI، NDVIT، تم استخدام صورة Sentinel-2 ملقطة بعد الحرائق، بدقة مكانية تبلغ 10 أمتار، كمرجع مرجي موثوق لتمييز المناطق المحترقة عن غير المحترقة. هذا وقد جرى تبسيط خرائط شدة الحرائق من خلال إعادة تصنيفها إلى صفين فقط هما: محترق Burned وغير محترق Unburned، مما يسمح بإجراء تقييم دقيق وموضوعي. تم اختيار 100 نقطة تقييم موزعة باستخدام طريقة التوزيع الطبيعي العشوائي المتساوي Equalized Stratified Random لضمان

تمثيل متوازن لكلا الصنفين داخل منطقة الدراسة (الشكل (18)). وبالاعتماد على هذه النقاط المرجعية، تم حساب مؤشرات الدقة الشائعة (الجدول (6)), مثل الدقة الكلية Overall Accuracy (وهي مجموع القيم الصحيحة مقسمة على المجموع الكلي)، دقة المنتج Producer's Accuracy (تشير إلى نسبة التقدير الصحيح من أصل الحالات الفعلية لكل صنف)، دقة المستخدم User's Accuracy (وتشير إلى مدى صحة التقديرات لكل صنف)، ومعامل كابا Kappa Coefficient (مقياس يقيّم مدى الانفاق بين التصنيف والواقع، ويأخذ بعين الاعتبار الانفاق العشوائي)، وذلك لقياس مدى تطابق تصنيف المؤشرات مع الواقع الأرضي. تُفهم هذه الخطوة في تقييم فعالية كل مؤشر في رصد وتميز آثار الحرائق بشكل موثوق، وتعزز موثوقية النتائج المستخلصة من الدراسة.

يتضح من الجدول (6) أنّ مؤشر NBRT و NDVIT هما الأكثر دقة، حيث سجلا أعلى دقة إجمالية بلغت 0.91، وأعلى قيمة لمعامل كابا بلغت 0.82، ما يشير إلى قوة أدائهم في التمييز بين المناطق المتأثرة وغير المتأثرة بالحريق مع تقليل احتمالية الانفاق العشوائي. كما تميز NDVIT بتحقيق دقة مستخدم كاملة (100%) للمناطق غير المحترقة، ودقة منتج كاملة للمناطق المحترقة، مما يعكس توازنه العالي في التصنيف.

في المقابل، جاءت نتائج NBR و VI6T متقاربة وسجلت دقة إجمالية أقل (0.72) ومعامل كابا (0.72)، مما يشير إلى ضعف نسبي في قدرتهما على تصنيف المناطق المحترقة بشكل دقيق. أما مؤشر VI6T فحقق نتائج متوسطة، حيث سجل دقة إجمالية بلغت 0.74 ومعامل كابا 0.74، مما يجعله أفضل من NBR و NDVIT، لكن دون تفوق على NBRT و NDVIT و بناءً على هذه النتائج، يُوصى باعتماد مؤشر NBRT و NDVIT لتقدير شدة حرائق الغابات بدقة وموثوقية أعلى ضمن المنطقة المدروسة.

الجدول (6) مؤشرات الدقة الشائعة لتقدير خرائط شدة الحرائق.

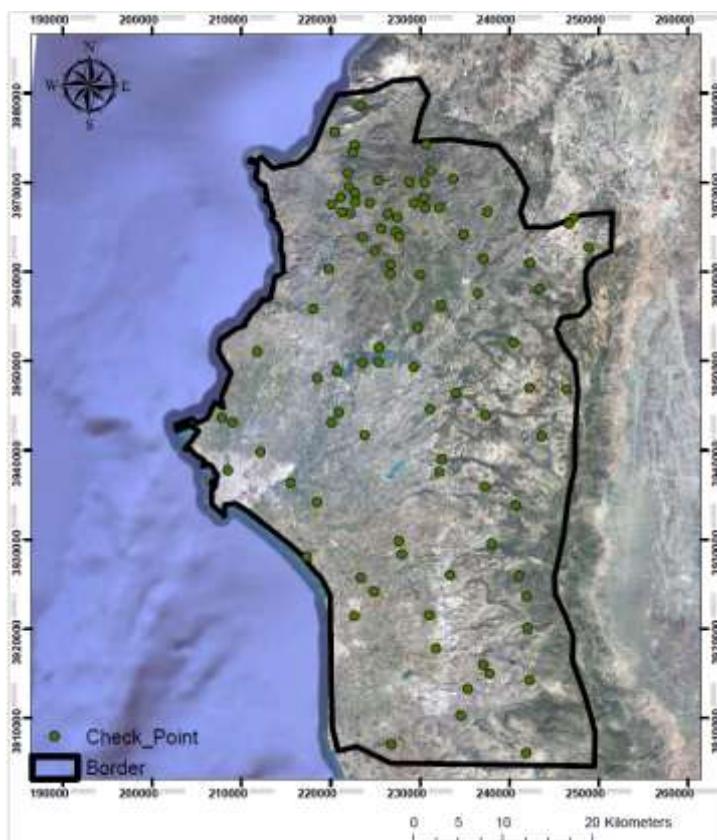
Kappa	OA	PA-Burned	PA-Unburned	UA-Burned	UA-Unburned	المؤشر
0.72	0.86	0.95	0.80	0.76	0.96	NBR
0.82	0.91	0.98	0.86	0.84	0.98	NBRT
0.72	0.86	0.97	0.79	0.74	0.98	NDVI
0.82	0.91	1.00	0.85	0.82	1.00	NDVIT
0.74	0.87	0.93	0.82	0.80	0.94	VI6T

3- حساب المساحات المحترقة من المؤشرات الطيفية

اعتمدت عملية حساب المساحات المحترقة في هذا البحث على خرائط شدة الحرائق السابقة، حيث تم استخدام هذه الخرائط لتصنيف عناصر الصورة إلى ثلاثة فئات: غير محترقة، احتراق متوسط، واحتراق شديد، وذلك وفقاً لعتبات محددة تختلف باختلاف المؤشر المستخدم. نوضح في الجدول (7) عتبات هذه التصنيفات.

الجدول (7). عتبات تصنیف درجات الحرائق.

عتبات التصنيف	المؤشر
0.1, 0.27, 0.44	NBR
-0.1, 0.1, 0.3	NBRT
-0.1, 0.1, 0.3	NDVI
-0.1, 0.1, 0.3	NDVIT
-0.1, 0.1, 0.3	VI6T



الشكل (18). نقاط الاختبار لتقدير خانط شدة الحرائق

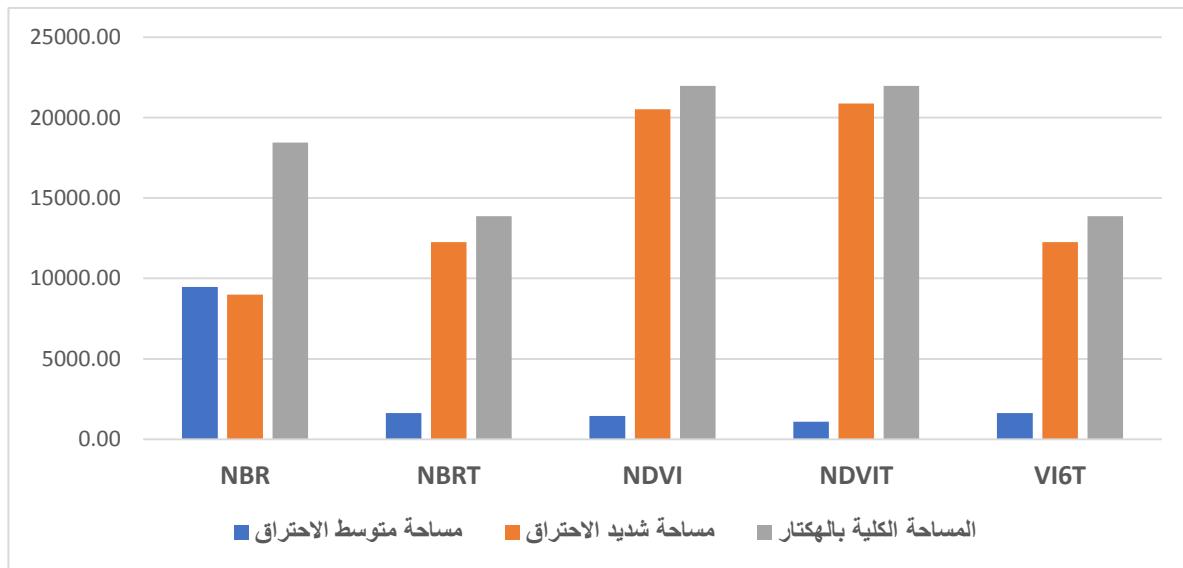
بعد التصنيف، حُسبت المساحة لكل فئة عبر ضرب عدد عناصر الصورة المصنفة بمساحة عنصر الصورة المفرد، وتم إجراء هذه الحسابات سواء على صورة التغيير المجمعة أو على الصور اليومية لمراقبة تطور المساحات المتدهورة زمنياً. تتيح هذه المنهجية بناء رسوم بيانية وتحليلات إحصائية توضح ديناميكية الحرائق وذروته ومدى انتشاره. الجدول (8) يوضح المساحات المحسوبة.

الجدول (8). مساحات أصناف شدة الحرائق والمساحات الكلية للمناطق المحترقة

نسبة التدهور (%)	المساحة الكلية للمناطق المحترقة (هكتار)	مساحة المناطق شديد الاحتراق (هكتار)	مساحة المنطقة متوسطة الاحتراق (هكتار)	المساحة الكلية للمنطقة (هكتار)	المؤشر
7%	18,454.93	8984.94	9469.99	262656.83	NBR
5%	13867.00209	12246.16	1620.85	262656.83	NBRT
8%	21959.12911	20515.39	1443.74	262656.83	NDVI
8%	21959.12911	20870.40	1088.73	262656.83	NDVIT
5%	13867.00209	12246.16	1620.85	262656.83	VI6T

اعتماداً على المساحة الإجمالية للمنطقة المدروسة البالغة 262,656.83 هكتار، والمساحة المرجعية التي حدتها وزارة الزراعة والبالغة 20,000 هكتار، تم إجراء تحليل لنسب التدهور التي كشفت عنها المؤشرات الطيفية المختلفة بعد حرائق ريف اللاذقية الشمالي، مع مراعاة ظروف الجفاف التي سادت خلال الفترة المدروسة.

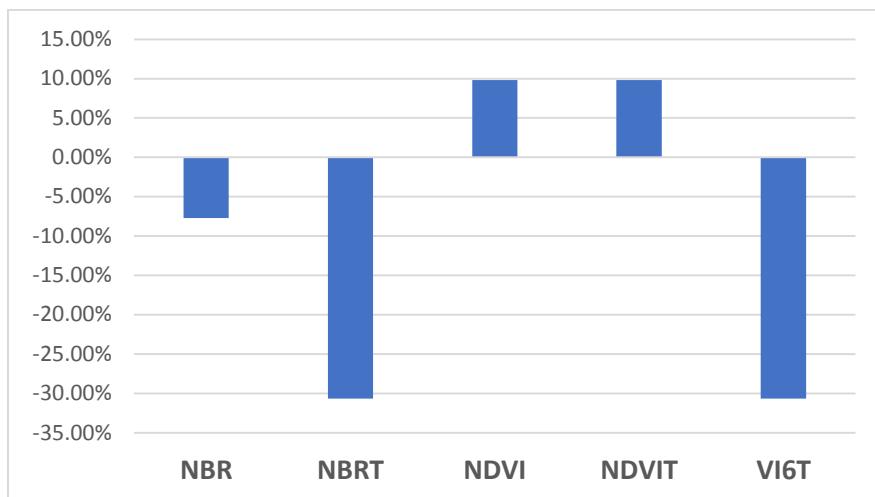
يتبيّن من الجدول (8) والشكل (19) أن المؤشرات الطيفية أظهرت تبايناً في تقدير المساحات المحترقة. فقد سجّل كل من NDVI و NDVIT أعلى تقدير للتدّهور بنسبة 8%， أي ما يعادل نحو 21,959 هكتاراً. هذه القيمة تتّجاوز الرقم المرجعي (20,000 هكتار) بنسبة حوالي 9.8%， مما يشير إلى حساسية هذين المؤشرتين للكشف عن التغييرات المتوسطة والطفيفة في الغطاء النباتي، والتي قد لا تكون ناتجة بشكل مباشر عن الحريق. من المرجح أن ظروف الجفاف ساهمت في تضخيم الإشارة الطيفية لتدّهور الغطاء النباتي، حيث أدى انخفاض الرطوبة إلى انكماش الغطاء الأخضر حتى في المناطق غير المتأثرة مباشرة، مما يفسّر ارتفاع التقديرات. في المقابل، قدر مؤشر NBR، الذي يُعد من أبرز المؤشرات المستخدمة في تقدير شدة الحرائق، مساحة التدهور بنحو 18,455 هكتاراً (أي 7% من إجمالي المساحة)، وهي أقل من المساحة المرجعية بنسبة حوالي 7.7%， ما يعكس تحفظه النسبي مقارنة ببعض المؤشرات الأخرى. يُعزى ذلك إلى اعتماده على التغييرات الحادة في البنية الطيفية للنبات، ما يجعله أقل تأثراً بظروف الجفاف، وبالتالي أكثر توافقاً مع التقديرات الميدانية في المناطق المتأثرة بشدة. أما مؤشراً NBRT و VI6T فقد أظهرتا أقل نسب تدهور بلغت 5%， أي نحو 13,867 هكتاراً، وهي أقل من المساحة المرجعية بحوالي 30.7%. يدلّ هذا على أن هذه المؤشرات ترتكز بشكل رئيسي على المناطق شديدة الاحتراق فقط، مما يقلّل من حساسيتها لتدّهور الغطاء النباتي الخيف أو متوسط الشدة، سواء كان ناجماً عن الحريق أو الجفاف. نوضح في الشكل (20) فروق تقدير المساحات الكلية للمناطق المحترقة والمحسوبة بتطبيق المؤشرات الطيفية المدروسة بالمقارنة مع المساحة المرجعية البالغة 20,000 هكتار وذلك كنسبة مئوية.



الشكل (19). مساحة المناطق المحترقة باستخدام المؤشرات الطيفية

4- تحليل العلاقة بين شدة الحرائق والمتغيرات المناخية خلال فترة الدراسة

تم خلال هذه الدراسة جمع وتحليل بيانات مناخية رئيسية متوافقة مع تواريخ توافر صور Sentinel2 SR لمنطقة الدراسة، شملت درجات الحرارة القصوى، وسرعة الرياح، والهطول المطري، للفترة من 3 إلى 13 تموز 2025، بهدف دراسة تأثير هذه العوامل على شدة الحرائق وتطورها في ريف اللاذقية الشمالي (الجدول (9)). كما تم حساب المساحات المحترقة المتفقة مع هذه التواریخ بمساعدة GEE وذلك باعتماد المؤشرات الطيفية المدروسة وهي موضحة في الجدول (10).



الشكل (20). فروق التقدير (%) في المساحات المحترقة التي حدتها المؤشرات الطيفية مقارنة بالقيمة المرجعية.

الجدول (9). البيانات مناخية رئيسية المتواقة مع تواريخ توافر صور Sentinel2 SR لمنطقة الدراسة.

الهطول (مم)	سرعة الرياح (كم/س)	درجة الحرارة العظمى (°C)	التاريخ
0	50	27.9	2025-07-03
0	66	28.9	2025-07-08
0	60	29.8	2025-07-10
0	45	32.1	2025-07-13

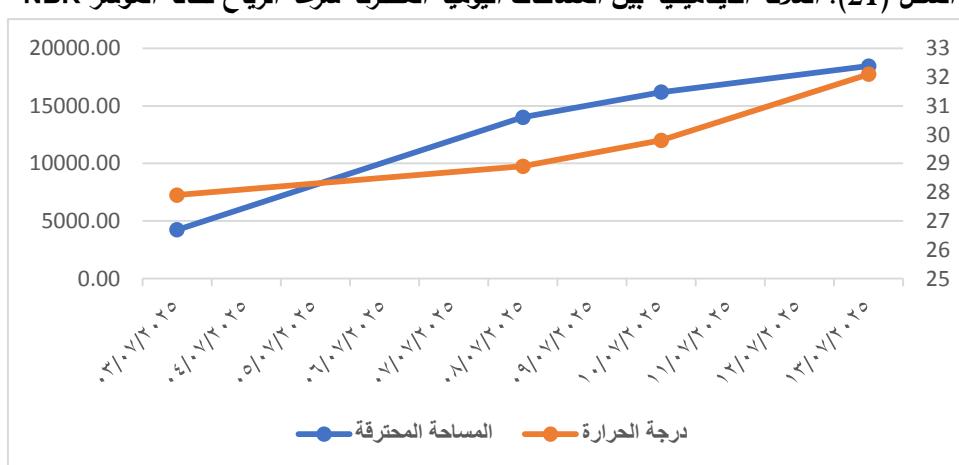
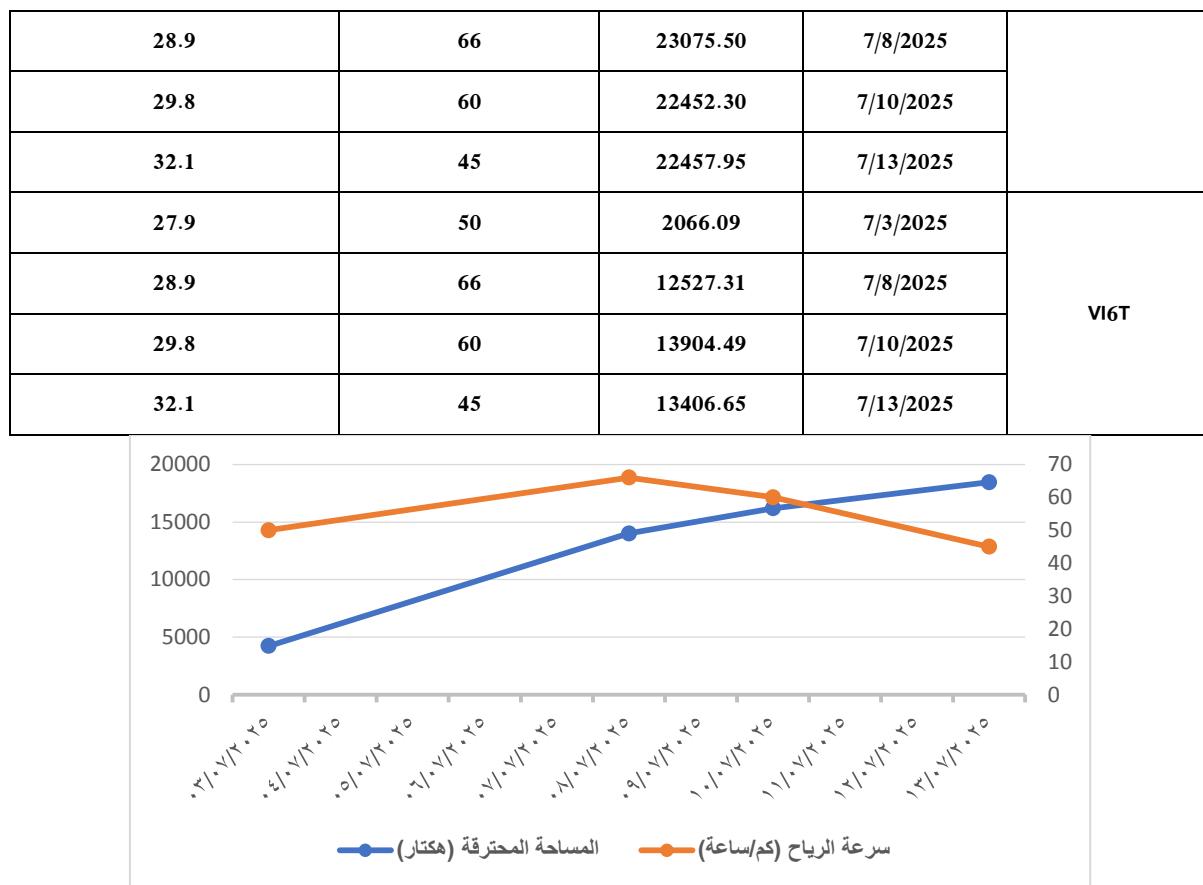
الجدول (10). المساحات المحترقة يومياً خلال فترة الدراسة.

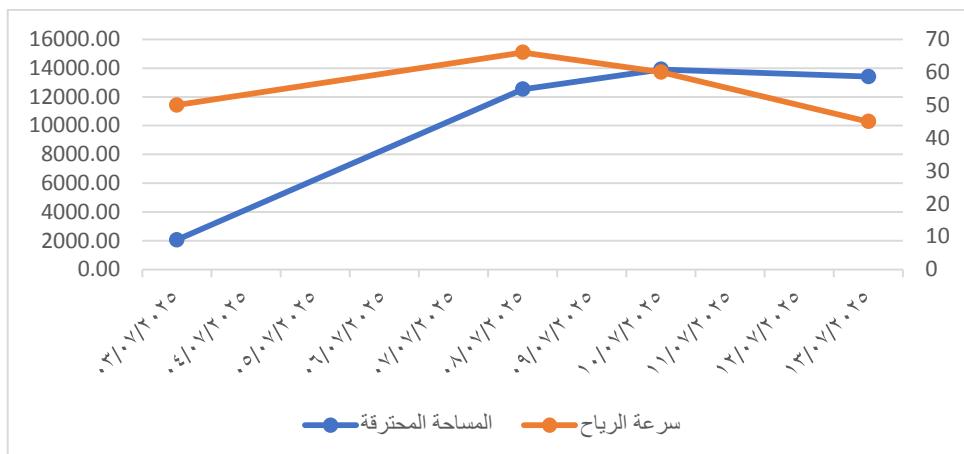
المؤشر	التاريخ	المساحة المحترقة (هكتار)
NBR	7/3/2025	4241.01
	7/8/2025	14010.18
	7/10/2025	16187.00
	7/13/2025	18454.93
NBRT	7/3/2025	2066.09
	7/8/2025	12527.31
	7/10/2025	13904.49
	7/13/2025	13406.65
NDVI	7/3/2025	8042.80
	7/8/2025	23075.50
	7/10/2025	22452.30
	7/13/2025	22457.95
NDVIT	7/3/2025	8042.80
	7/8/2025	23075.50
	7/10/2025	22452.30
	7/13/2025	22457.95
VI6T	7/3/2025	2066.09
	7/8/2025	12527.31
	7/10/2025	13904.49
	7/13/2025	13406.65

ترجع الفروقات الملحوظة في تقدير المساحة الكلية للمناطق المحترقة عند استخدام الصورة المركبة متعددة الأيام (الجدول (8)) مقارنةً بصورة يوم محدد (الجدول (10)) إلى خصائص وتقنيات المعالجة الفضائية المختلفة المستخدمة في رصد التغيرات الطيفية الناتجة عن الحرائق. في الواقع عند كتابة الكود في GEE تم إنتاج صورة مركبة Median composite من تجميع إحصائي لقيم عناصر الصورة عبر فترة زمنية معينة بعد الحريق، حيث يتم اختيار القيمة الوسيطية لكل عنصر صورة Pixel ضمن مجموعة الصور المتاحة. هذه الطريقة تقلل من تأثير الضباب، الغيوم، الدخان، والتغيرات الجوية المؤقتة، كما تسمح برصد التغيرات الطيفية التدريجية أو المتأخرة التي قد لا تظهر بشكل واضح في صورة يوم واحد فقط. وبالتالي، فإن الصورة المركبة تعكس تمثيلاً أكثر شمولاً ونظاماً لمساحات التدهور الناتجة عن الحرائق. أما الصور المأخوذة في يوم معين فتُظهر الحالة الطيفية للغطاء الأرضي في لحظة زمنية محددة فقط، والتي قد تتأثر بعامل جوية مثل الغيوم أو الدخان، فضلاً عن التأثير في ظهور تأثيرات الحريق الطيفية التي تتطلب أحياناً فترة زمنية لرصدها بدقة. إضافةً إلى ذلك، يمكن أن تؤثر التقليبات الطبيعية في الغطاء النباتي أو الظروف البيئية المؤقتة على قيم المؤشرات الطيفية في تلك اللحظة. في كل الأحوال، يُعد تحليل المساحات المحترقة أو المتدهورة يومياً وربطها بالمتغيرات المناخية مثل درجة الحرارة وسرعة الرياح خطوة مهمة تعطي مؤشرات مفيدة لتحليل ديناميكية تطور الحرائق وتأثير العوامل الجوية عليها بشكل زمني. نوضح في الجدول (11) والأشكال من 21 حتى 30 علاقة المساحة اليومية المحترقة مع سرعة الرياح ودرجة الحرارة لكل من المؤشرات المدروسة. ونشير إلى أنه لم يتم دراسة العلاقة مع الهطولات لأنها صفرية خلال كل فترة الدراسة.

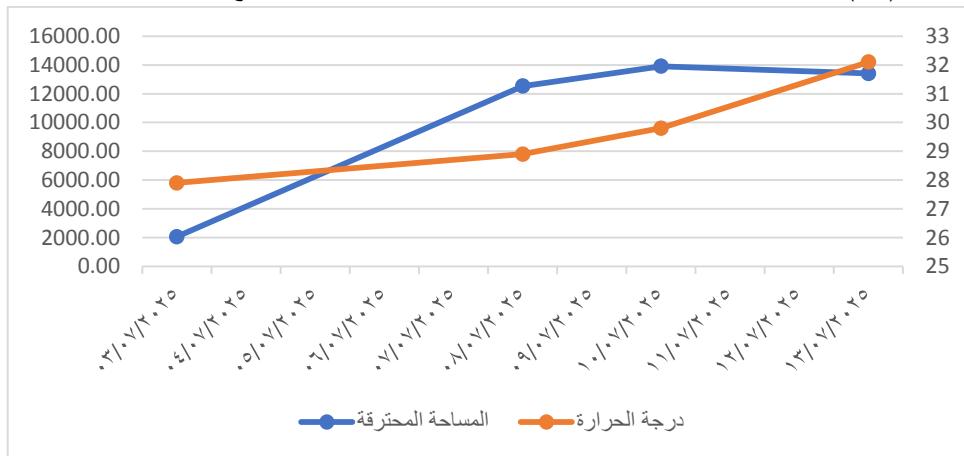
الجدول (11). علاقة المساحة اليومية المحترقة مع سرعة الرياح ودرجة الحرارة لكل من المؤشرات المدروسة.

المؤشر	NDVIT	NDVI	NBRT	NBR
درجة الحرارة (درجة مئوية)	درجة الحرارة (كم/سا)	سرعنة الرياح	المساحة المحترقة	التاريخ
27.9	50	4241.01	7/3/2025	
28.9	66	14010.18	7/8/2025	
29.8	60	16187.00	7/10/2025	
32.1	45	18454.93	7/13/2025	
27.9	50	2066.09	7/3/2025	
28.9	66	12527.31	7/8/2025	
29.8	60	13904.49	7/10/2025	
32.1	45	13406.65	7/13/2025	
27.9	50	8042.80	7/3/2025	
28.9	66	23075.50	7/8/2025	
29.8	60	22452.30	7/10/2025	
32.1	45	22457.95	7/13/2025	
27.9	50	8042.80	7/3/2025	

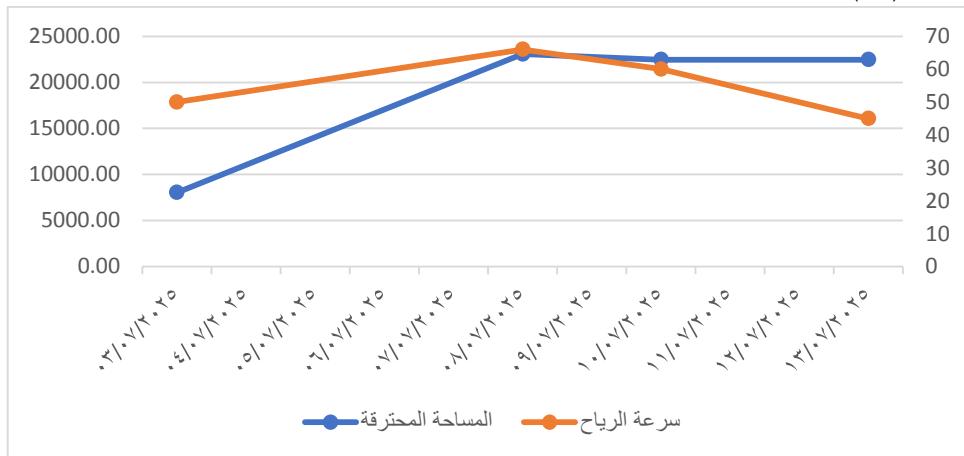




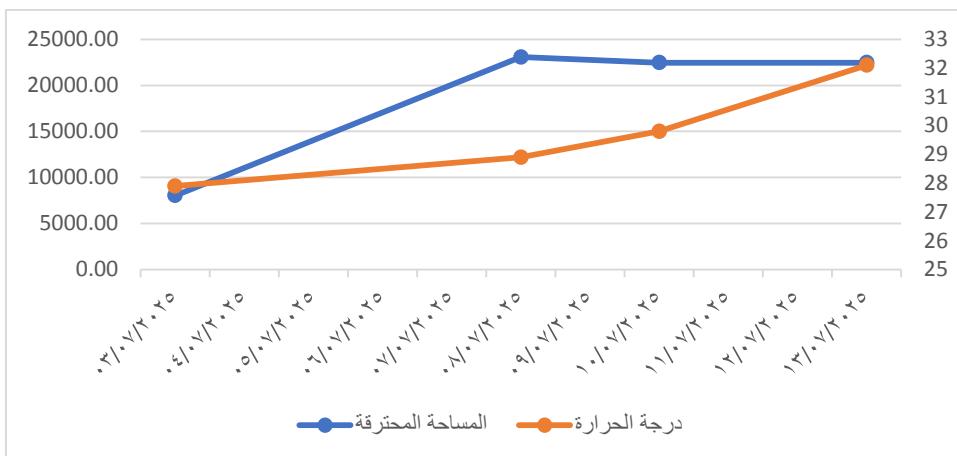
الشكل (23). العلاقة الديناميكية بين المساحات اليومية المحترقة سرعة الرياح لحالة المؤشر NBRT



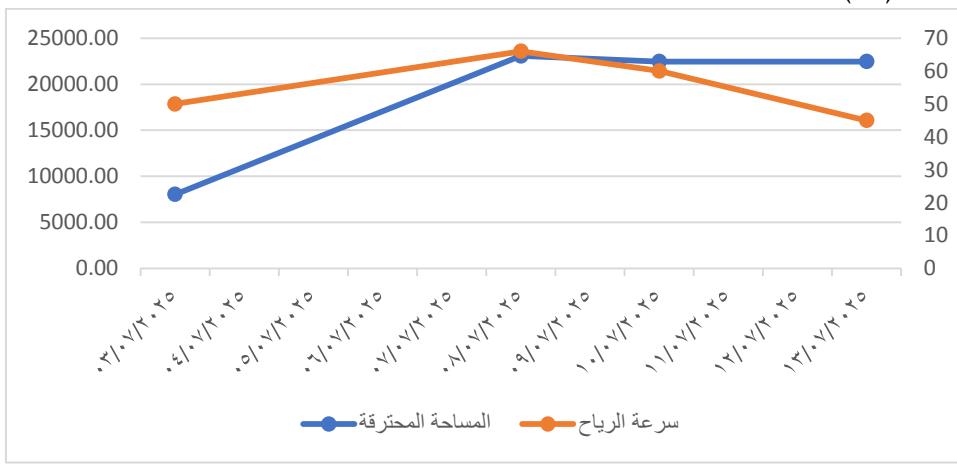
الشكل (24). العلاقة الديناميكية بين المساحات اليومية المحترقة ودرجة الحرارة لحالة المؤشر NBRT



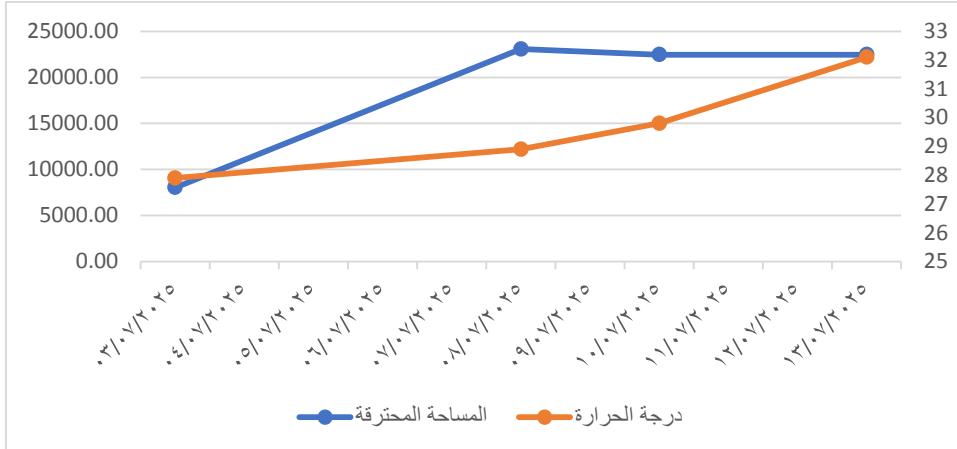
الشكل (25). العلاقة الديناميكية بين المساحات اليومية المحترقة سرعة الرياح لحالة المؤشر NDVI



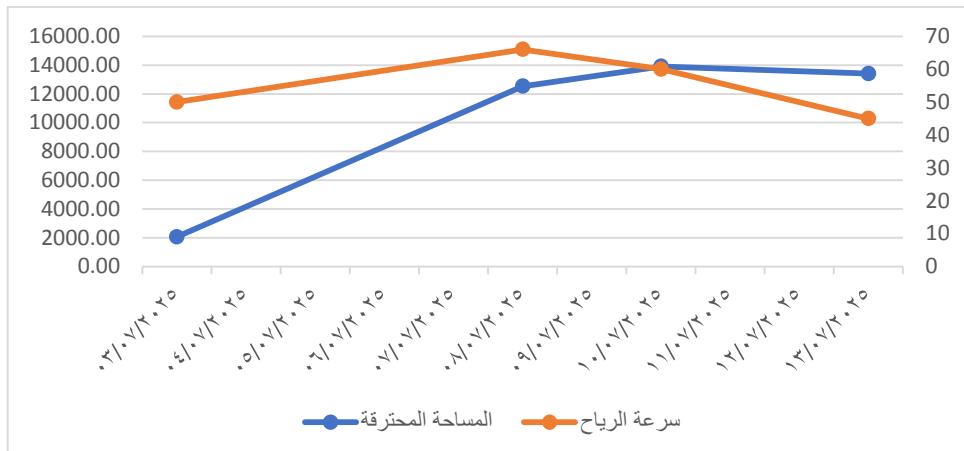
الشكل (26). العلاقة الديناميكية بين المساحات اليومية المحترقة ودرجة الحرارة لحالة المؤشر NDVI



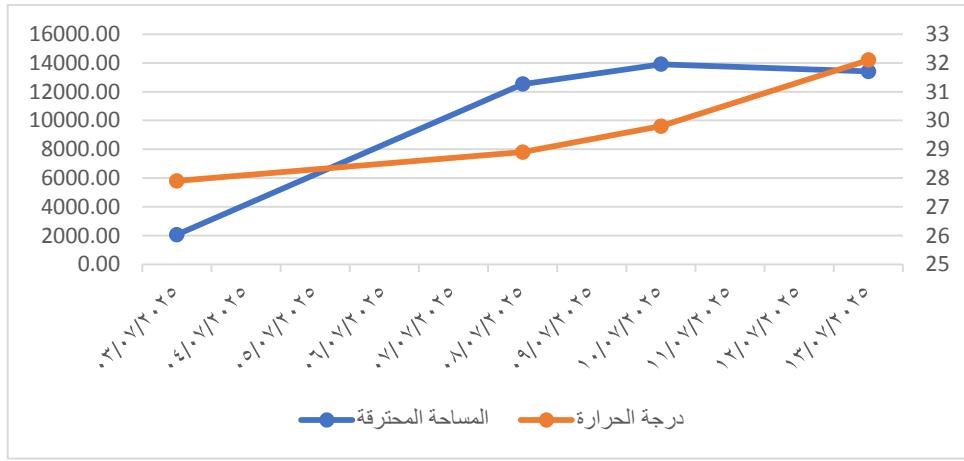
الشكل (27). العلاقة الديناميكية بين المساحات اليومية المحترقة سرعة الرياح لحالة المؤشر NDVIT



الشكل (28). العلاقة الديناميكية بين المساحات اليومية المحترقة ودرجة الحرارة لحالة المؤشر NDVIT



الشكل (29). العلاقة الديناميكية بين المساحات اليومية المحترقة سرعة الرياح لحالة المؤشر VI6T



الشكل (30). العلاقة الديناميكية بين المساحات اليومية المحترقة ودرجة الحرارة لحالة المؤشر VI6T

بناءً على بيانات الجدول (11) تم حساب معاملات الارتباط (Pearson) بين المساحات المحترقة ودرجة الحرارة وسرعة الرياح وهي موضحة في الجدول (12).

الجدول (12). علاقة معاملات الارتباط بين المساحات المحترقة ودرجة الحرارة وسرعة الرياح.

معامل الارتباط مع سرعة الرياح	معامل الارتباط مع درجة الحرارة	المؤشر
0.090	0.843	NBR
0.327	0.688	NBRT
0.395	0.638	NDVI
0.395	0.638	NDVIT
0.327	0.688	VI6T

تشير معاملات الارتباط المحسوبة بين المساحات المحترقة المقدرة بواسطة المؤشرات الطيفية المختلفة، من جهة، وكل من درجة الحرارة وسرعة الرياح من جهة أخرى، إلى أن درجة الحرارة كانت العامل الجوي الأكثر تأثيراً في تحديد شدة اتساع رقعة الحريق خلال الفترة المدروسة. فقد أظهر مؤشر NBR، الذي يُعد من أكثر المؤشرات استخداماً في تقييم شدة الحرائق، أقوى ارتباط مع درجة الحرارة (0.843)، وهو ارتباط طردي قوي يدل على حساسية هذا المؤشر للتغيرات الحرارية الحادة التي تؤثر مباشرة على البنية الطيفية للغطاء النباتي. كما أظهرت المؤشرات VI6T وNBRT وNDVIT أقل ارتباطاً متوسطاً قوياً مع درجة الحرارة (0.688)، في حين كان الارتباط مع مؤشر NDVI وNDVIT أقل نسبياً (0.638)، وهو ما يعكس تأثيراً واضحاً ولكن أقل حدة، ربما بسبب تأثر هذه المؤشرات بتغيرات تدريجية في الكثافة

النباتية وليس فقط بالحرائق الشديدة. في المقابل، كانت معاملات الارتباط بين المساحات المحترقة وسرعة الرياح أضعف بوجه عام، حيث تراوحت بين 0.090 (NBR) و 0.395 (NDVIT)، وهذا يشير إلى أن سرعة الرياح لم تكن العامل المحدد الرئيسي في سلوك الحريق خلال الفترة المدروسة، بل لعبت دوراً ثانوياً مقارنةً بدرجة الحرارة. ويُحتمل أن تكون الرياح قد ساهمت بشكل كبير في يوم معين (كما في 8 تموز عندما بلغت 66 كم/سا)، لكن العلاقة العامة على مدى فترة الدراسة لم تكن قوية أو منتظمة بما يكفي لتعكس ارتباطاً واضحاً عبر جميع المؤشرات. بناءً عليه، يمكن القول إن ارتفاع درجة الحرارة كان المحرك الرئيسي وراء ازدياد المساحات المتدهورة كما تم رصدها طيفياً، بينما جاءت مساهمة الرياح موضوعية ومحدودة التأثير إحصائياً. وهذا يدعم أهمية التركيز على المتغيرات الحرارية في تفسير أنماط الحرائق ضمن البيئات ذات الغطاء النباتي الكثيف وظروف الجفاف.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

سعى هذا البحث إلى تقييم شدة حرائق الغابات التي اجتاحت ريف اللاذقية الشمالي في تموز 2025، من خلال تحليل خمسة مؤشرات طيفية هي NBR، NDVIT، NBRT، NDVI، VI6T قبل الحريق وبعد، وربطها مع البيانات المناخية (درجة الحرارة وسرعة الرياح)، مع الاستفاده من إمكانيات منصة Google Earth Engine في تحليل صور الأقمار الصناعية.

أوضحت النتائج وجود تغيرات واضحة في القيم الدنيا والمتوسطة والعظمى للمؤشرات قبل وبعد الحريق، حيث شهدت جميع المؤشرات انخفاضاً طفيفاً في القيمة المتوسطة بعد الحريق، مما يعكس التأثير المباشر للنيران على الغطاء النباتي. فمثلاً، انخفض متوسط مؤشر NBR من 0.25 إلى 0.22، ومؤشر NBRT من 0.05 إلى 0.03، بينما سجل مؤشر NDVI تراجعاً من 0.47 إلى 0.43، مع انخفاض مماثل في مؤشرات NDVIT و VI6T، أظهرت المؤشرات التي تدمج بيانات الحرارة مثل NBRT و NDVIT استجابة أكثر حساسية للتغيرات التي تسببها الحرائق مقارنة بالمؤشرات النباتية التقليدية، خاصة عند النظر إلى المتوسطات التي تعكس الاتجاه العام للتغير على مستوى المنطقة.

بالنسبة للتوزيع المكاني للحريق، أظهرت خرائط الفرق الطيفي وجود نمط مكاني متجانس لمناطق الحرائق، مع تركيز في غابات قسطل معاف وجبل التركمان وقرى نبع المر. مع ذلك، أظهرت مؤشرات NDVIT و NDVI بعض المناطق المصنفة كحادة الاحتراق لم تسجلها المؤشرات الأخرى بنفس الدرجة، مما يعود لتأثير عوامل بيئية أخرى مثل الجفاف وانخفاض المطر المطول. أظهرت نتائج مصفوفات الخطأ المستخدمة لتقييم خرائط شدة الحريق أن المؤشرين NBRT و NDVIT يتميزان بأعلى دقة كلية (0.91) ومعامل كابا (0.82)، مما يؤكّد فعاليتهما في رصد تأثير الحريق بدقة، خاصة NDVIT الذي أظهر استجابة متزامنة للتغيرات الطيفية والحرارية. في المقابل، أظهر NDVI دقة أقل للمناطق المحترقة، رغم تقدّره المرتفع للمساحات المتدهورة، ما يعكس تأثيره بالجفاف. أما VI6T و NBR فحققا نتائج متوسطة مع استقرار نسبي في الأداء. وتؤكد هذه النتائج أهمية استخدام مزيج من المؤشرات النباتية والحرارية لضمان دقة أعلى في تقييم شدة الحرائق.

فيما يتعلق بتقدير المساحات المتدهورة، سجلت مؤشرات NDVIT و NDVI أعلى تقدّير بنسبة 8%， بما يعادل 21,959 هكتاراً، متداوّلة الرقم المرجعي البالغ 20,000 هكتار بنسبة 9.8%. في المقابل، قدر مؤشر NBR مساحة

التدور بنحو 18,455 هكتاراً (7%)، مما يعكس دقته واستقراره. أما مؤشرات NBRT وVI6T فقدرت المساحات بحوالي 13,867 هكتاراً فقط (5%)، ما يشير إلى تركيزها على التدمر الشديد فقط. وأظهرت معاملات الارتباط أن درجة الحرارة هي العامل الأبرز المؤثر على اتساع رقعة الحريق، حيث بلغ قيمة معامل ارتباطها بمؤشر NBR القيمة 0.843، بينما كان تأثير سرعة الرياح أقل وأظهر ارتباطات ضعيفة تراوحت بين 0.090 و 0.395، مع استثناء يوم محدد شهد رياحاً قوية. بناءً عليه، يؤكد البحث على أن ارتفاع درجات الحرارة كان المحرك الأساسي لانتشار الحرائق، مما يعزز أهمية دمج المتغيرات المناخية الحرارية في نظم التبيؤ ومراقبة الحرائق.

من ناحية أخرى، لوحظ في بعض النتائج ظهور قيم محترقة في مناطق تحتوي على مسطحات مائية صغيرة أو ذات انعكاس طيفي داكن، ويعزى ذلك إلى التشابه الطيفي بين المياه الراكدة أو الظلية والمناطق المتتحمة بعد الحريق، ولا سيما في نطاقات القريب وتحت الأحمر. وعلى الرغم من أن هذا التأثير كان محدوداً ولم يؤثر على النتائج العامة، إلا أنه يسلط الضوء على أهمية تطبيق قناع مائي (Water Mask) في الدراسات المستقبلية لاستبعاد المسطحات المائية قبل إجراء الحسابات الطيفية، بما يضمن تحسين دقة التقديرات المكانية للمناطق المحترقة.

التوصيات:

توصي هذه الدراسة بضرورة تعزيز استخدام مؤشر NDVIT في دراسات الحرائق، نظراً لما أظهره من أداء ثابت وقدرته على التقاط التغيرات الطيفية والحرارية بشكل متزامن. كما تؤكد النتائج أهمية دمج البيانات المناخية، وخاصة درجات الحرارة، في نظم التبيؤ بالحرائق. وتتبه الدراسة إلى ضرورة عدم الاعتماد على مؤشر واحد فقط، بل توصي باستخدام مزيج من المؤشرات النباتية والحرارية للحصول على تقدير أكثر دقة وواقعية. كما يجب التعامل بحذر مع القيم الطيفية تحت ظروف الجفاف، إذ إن انخفاض الرطوبة قد يضخم من الإشارة الطيفية ويفسر خطأً على أنه أثر مباشر للحرائق. كما توصي بإدراج قناع مائي مسبق في المعالجة المكانية للمؤشرات الطيفية لتجنب تصنيف المسطحات المائية أو الظل الداكنة كمناطق محترقة، وذلك باستخدام قواعد بيانات عالمية مثل JRC Water Surface أو MOD44W. وأخيراً، تشدد الدراسة على أهمية استخدام منصات ساحية مثل Google Earth، لما توفره من سرعة ودقة في تحليل صور الأبنوار الصناعية، خاصة في المناطق الواسعة أو المتكررة التعرض للحرائق.

References:

- [1] J. T. Abatzoglou, A. P. Williams, and R. Barbero, "Global Emergence of Anthropogenic Climate Change in Fire Weather Indices," *Geophysical Research Letters*, vol. 46, no. 1, pp. 326–336, 2019.
- [2] D. M. J. S. Bowman, A. Moreira-Muñoz, C. A. Kolden, R. O. Chávez, A. A. Muñoz, F. Salinas, ... and L. M. Johnston, "Human–environmental drivers and impacts of the globally extreme 2017 Chilean fires," *Ambio*, vol. 48, no. 4, pp. 350–362, 2019.
- [3] Y. Zhang, Z. Wang, Y. Lu, and L. Zuo, "Biodiversity, ecosystem functions and services: Interrelationship with environmental and human health," *Frontiers in Ecology and Evolution*, vol. 10, p. 1086408, 2022.
- [4] P. Morgan, C. C. Hardy, T. W. Swetnam, M. G. Rollins, and D. G. Long, "Mapping fire regimes across time and space: Understanding coarse and fine-scale fire patterns," *International Journal of Wildland Fire*, vol. 10, no. 3–4, pp. 329–342, 2001.
- [5] C. H. Key and N. C. Benson, "Landscape assessment: Sampling and analysis methods," in *FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system*, D. C. Lutes, R. E. Keane, J. F. Caratti, et al., Eds. USDA Forest Service, RMRS-GTR-164-CD, 2006.

- [6] J. D. Miller and A. E. Thode, "Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR)," *Remote Sensing of Environment*, vol. 109, no. 1, pp. 66–80, 2007.
- [7] S. Escuin, R. Navarro, and P. Fernández, "Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from LANDSAT TM/ETM images," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 29, no. 4, pp. 1053–1073, 2008.
- [8] S. Veraverbeke, S. Lhermitte, W. W. Verstraeten, and R. Goossens, "Assessment of post-fire changes in land surface temperature and surface albedo, and their relation with fire severity in the Mediterranean," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 31, no. 12, pp. 3141–3156, 2010.
- [9] J. A. López-Sáez, D. Abel-Schaad, R. Luelmo-Lautenschlaeger, S. Robles-López, S. Pérez-Díaz, F. Alba-Sánchez, ... and R. G. Gavilán, "Resilience, vulnerability and conservation strategies in high-mountain pine forests in the Gredos range, central Spain," *Plant Ecology & Diversity*, vol. 11, no. 1, pp. 97–110, 2018.
- [10] Dayoub, F., Abbas, H., Idriss, Younes. (2012). Forest fire monitoring in Nabe Matta Protected area(Tartous) utilizing the technology of remote sensing and Geographic Information System. Latakia University Journal -Biological Sciences Series, 35(3).
- [11] A. Fernández-Manso, C. Quintano, and D. A. Roberts, "Burn severity influence on post-fire vegetation recovery at multiple scales in a Mediterranean environment," *Remote Sensing of Environment*, vol. 184, pp. 112–123, 2016.
- [12] R. Meng, P. E. Dennison, F. Zhao, and M. A. Moritz, "Remote sensing analysis of vegetation recovery following short-interval fires in Southern California shrublands," *PLOS ONE*, vol. 12, no. 11, p. e0188883, 2014.
- [13] E. Chuvieco, I. González, F. Verdú, I. Aguado, and M. Yebra, "Prediction of fire occurrence from live fuel moisture content measurements in a Mediterranean ecosystem," *International Journal of Wildland Fire*, vol. 18, no. 4, pp. 430–441, 2009.
- [14] G. De Luca, G. Modica, J. M. Silva, S. Praticò, and J. M. Pereira, "Assessing tree crown fire damage integrating linear spectral mixture analysis and supervised machine learning on Sentinel-2 imagery," *International Journal of Digital Earth*, vol. 16, no. 1, pp. 3162–3198, 2023.
- [15] A. M. S. Smith, C. A. Kolden, W. T. Tinkham, A. F. Talhelm, J. D. Marshall, A. T. Hudak, and L. Boschetti, "Remote sensing the vulnerability of vegetation in natural terrestrial ecosystems," *Remote Sensing of Environment*, vol. 154, pp. 322–337, 2014.
- [16] Y. Jin, M. L. Goulden, N. Faivre, S. Veraverbeke, F. Sun, A. Hall, and J. T. Randerson, "Identification of two distinct fire regimes in Southern California: Implications for economic impact and future change," *Environmental Research Letters*, vol. 10, no. 9, p. 094005, 2015.
- [17] S. A. Parks, G. K. Dillon, and C. Miller, "A new metric for quantifying burn severity: the relativized burn ratio," *Remote Sensing*, vol. 6, no. 3, pp. 1827–1844, 2014.
- [18] A. H. Mohamed, J. L. Holechek, D. W. Bailey, C. L. Campbell, and M. N. DeMers, "Mesquite encroachment impact on southern New Mexico rangelands: remote sensing and geographic information systems approach," *Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 5, no. 1, p. 053514, 2011.
- [19] Ghazzaz, F., Dakka, M., & Idris, Y. (2024). Studying the Impact of Forest Fires on Soil Degradation Using Geographic Information Systems and Remote Sensing in the Al-

- Bayer and Al-Basit Region. Latakia University Journal -Biological Sciences Series, 46(1), 205–227.
- [20] J. Epting, D. Verbyla, and B. Sorbel, "Evaluation of remotely sensed indices for assessing burn severity in interior Alaska using Landsat TM and ETM+," *Remote Sensing of Environment*, vol. 96, no. 3–4, pp. 328–339, 2005.
- [21] N. H. French, E. S. Kasischke, R. J. Hall, K. A. Murphy, D. L. Verbyla, E. E. Hoy, and J. L. Allen, "Using Landsat data to assess fire and burn severity in the North American boreal forest region: an overview and summary of results," *International Journal of Wildland Fire*, vol. 17, no. 4, pp. 443–462, 2008.
- [22] S. Harris, S. Veraverbeke, and S. Hook, "Evaluating spectral indices for assessing fire severity in chaparral ecosystems (Southern California) using MODIS/ASTER (MASTER) airborne simulator data," *Remote Sensing*, vol. 3, no. 11, pp. 2403–2419, 2011.
- [23] J. W. Van Wagendonk, R. R. Root, and C. H. Key, "Comparison of AVIRIS and Landsat ETM+ detection capabilities for burn severity," *Remote Sensing of Environment*, vol. 92, no. 3, pp. 397–408, 2004.
- [24] K. A. Murphy, J. H. Reynolds, and J. M. Koltun, "Evaluating the ability of the differenced Normalized Burn Ratio (dNBR) to predict ecologically significant burn severity in Alaskan boreal forests," *International Journal of Wildland Fire*, vol. 17, no. 4, pp. 490–499, 2008.
- [25] R. Díaz-Delgado, F. Lloret, and X. Pons, "Influence of fire severity on plant regeneration by means of remote sensing imagery," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 24, no. 8, pp. 1751–1763, 2003.
- [26] R. F. Kokaly, B. W. Rockwell, S. L. Haire, and T. V. V. King, "Characterization of post-fire surface cover, soils, and burn severity at the Cerro Grande Fire, New Mexico, using hyperspectral and multispectral remote sensing," *Remote Sensing of Environment*, vol. 106, no. 3, pp. 305–325, 2007.
- [27] A. M. S. Smith, N. A. Drake, M. J. Wooster, A. T. Hudak, Z. A. Holden, and C. J. Gibbons, "Production of Landsat ETM+ reference imagery of burned areas within Southern African savannahs: comparison of methods and application to MODIS," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 28, no. 12, pp. 2753–2775, 2007.
- [28] S. Veraverbeke, S. Harris, and S. Hook, "Evaluating spectral indices for burned area discrimination using MODIS/ASTER (MASTER) airborne simulator data," *Remote Sensing of Environment*, vol. 115, no. 10, pp. 2702–2709, 2011.
- [29] S. Kalogiannidis, F. Chatzitheodoridis, D. Kalfas, C. Patitsa, and A. Papagrigoriou, "Socio-psychological, economic and environmental effects of forest," *Fire*, vol. 6, no. 7, p. 280, 2023.
- [30] Z. Zhu, X. Deng, F. Zhao, S. Li, and L. Wang, "How environmental factors affect forest fire occurrence in Yunnan forest region," *Forests*, vol. 13, no. 9, p. 1392, 2022.
- [31] A. Kolanek, M. Szymowski, and A. Raczyk, "Human activity affects forest fires: The impact of anthropogenic factors on the density of forest fires in Poland," *Forests*, vol. 12, no. 6, p. 728, 2021.
- [32] B. Hao, X. Xu, F. Wu, and L. Tan, "Long-term effects of fire severity and climatic factors on post-forest-fire vegetation recovery," *Forests*, vol. 13, no. 6, p. 883, 2022.
- [33] Y. Tian, Z. Wu, M. Li, B. Wang, and X. Zhang, "Forest fire spread monitoring and vegetation dynamics detection based on multi-source remote sensing images," *Remote Sensing*, vol. 14, no. 18, p. 4431, 2022.

- [34] A. A. Agbeshie, S. Abugre, T. Atta-Darkwa, and R. A. Awuah, "A review of the effects of forest fire on soil properties," *Journal of Forestry Research*, vol. 33, no. 5, pp. 1419–1441, 2022.
- [35] J. T. Abatzoglou, C. A. Kolden, A. C. Cullen, M. Sadegh, E. L. Williams, M. Turco, and M. W. Jones, "Climate change has increased the odds of extreme regional forest fire years globally," *Nature Communications*, vol. 16, no. 1, p. 6390, 2025.
- [36] S. Singh, "Forest fire emissions: A contribution to global climate change," *Frontiers in Forests and Global Change*, vol. 5, p. 925480, 2022.
- [37] D. Avetisyan, N. Stankova, and Z. Dimitrov, "Assessment of spectral vegetation indices performance for post-fire monitoring of different forest environments," *Fire*, vol. 6, no. 8, p. 290, 2023.
- [38] D. Feng, M. Fu, Y. Sun, W. Bao, M. Zhang, Y. Zhang, and J. Wu, "How large-scale anthropogenic activities influence vegetation cover change in China? A review," *Forests*, vol. 12, no. 3, p. 320, 2021.
- [39] Y. Qin, X. Xiao, J. P. Wigneron, P. Ciais, J. G. Canadell, M. Brandt, ... and B. Moore III, "Large loss and rapid recovery of vegetation cover and aboveground biomass over forest areas in Australia during 2019–2020," *Remote Sensing of Environment*, vol. 278, p. 113087, 2022.
- [40] V. Fernández-García, E. Marcos, S. Huerta, and L. Calvo, "Soil-vegetation relationships in Mediterranean forests after fire," *Forest Ecosystems*, vol. 8, no. 1, p. 18, 2021.
- [41] N. Evelpidou, M. Tzouxanioti, T. Gavalas, E. Spyrou, G. Saitis, A. Petropoulos, and A. Karkani, "Assessment of fire effects on surface runoff erosion susceptibility: The case of the summer 2021 forest fires in Greece," *Land*, vol. 11, no. 1, p. 21, 2021.
- [42] A. Han, S. Qing, Y. Bao, L. Na, Y. Bao, X. Liu, ... and C. Wang, "Short-term effects of fire severity on vegetation based on sentinel-2 satellite data," *Sustainability*, vol. 13, no. 1, p. 432, 2021.
- [43] A. EL Ashiry, "Evaluating the Accuracy of Change detection Using Spectral Indices and spectral classification, A Case Study of Fayoum Governorate, Egypt," *JES. Journal of Engineering Sciences*, vol. 52, no. 4, pp. 212–232, 2024.
- [44] M. R. Mahmood and H. J. Jumaah, "NBR index-based fire detection using sentinel-2 images and GIS: A case study in mosul park, Iraq," *International Journal of Geoinformatics*, vol. 19, no. 3, pp. 67–74, 2023.
- [45] S. Verma, M. Soni, H. Kumar, S. Payra, M. K. Mishra, and R. Bhawar, "Characterizing aerosols during forest fires over Uttarakhand region in India using multi-satellite remote sensing data," *Advances in Space Research*, vol. 70, no. 4, pp. 947–960, 2022.
- [46] J. W. Rouse, R. H. Haas, J. A. Schell, and D. W. Deering, "Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS," *NASA Spec. Publ.*, vol. 351, no. 1, p. 309, 1974.
- [47] S. K. Abujayyab, M. M. Kassem, A. A. Khan, R. Wazirali, M. Coşkun, E. Taşoğlu, and F. Toprak, "Wildfire susceptibility mapping using five boosting machine learning algorithms: the case study of the Mediterranean region of Turkey," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2022, no. 1, p. 3959150, 2022.
- [48] A. Oliveira, J. P. Matos-Carvalho, F. Moutinho, and N. Fachada, "Multispectral indices for wildfire management," *arXiv preprint arXiv:2309.01751*, 2023.
- [49] N. Gorelick, M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau, and R. Moore, "Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone," *Remote Sensing of Environment*, vol. 202, pp. 18–27, 2017.

- [50] N. Sidhu, E. Pebesma, and G. Câmara, "Using Google Earth Engine to detect land cover change: Singapore as a use case," *European Journal of Remote Sensing*, vol. 51, no. 1, pp. 486–500, 2018.