



مجلة الآداب للعلوم الإنسانية

المجلد التاسع، العدد الخاص (2)،

سبتمبر 2026، 188-149

Arts & Humanities Journal

Vol. 9, Special Issue (2),

September 2026, 149-188

Issn (النسخة المطبوعة): 3006-7561

Issn (النسخة الإلكترونية): 3006-757X

التعلم الآلي ومنصة GEE في نمذجة التغيرات البيئية للغطاء الأرضي بوادي الضباب- محافظة تعز أنموذجاً

الدكتورة/ تهاني عباس أحمد عقلان

أستاذ الجغرافية الطبيعية المساعد- قسم الجغرافيا ونظم المعلومات الجغرافية- كلية
الآداب- جامعة تعز

ta65ta56@gmail.com

dr.tahani.aqlan@taiz.edu.ye

تاريخ قبوله للنشر: 14 / 6 / 2026م

تاريخ استلام البحث: 25 / 4 / 2026م

<https://tuahj.org>

موقع المجلة:

التعلم الآلي ومنصة GEE في نمذجة التغيرات البيئية للغطاء الأرضي بوادي الضباب- محافظة تعز أنموذجاً

د/ تهاني عباس أحمد عقلاق

أستاذ الجغرافية الطبيعية المساعد- قسم الجغرافيا ونظم المعلومات الجغرافية- كلية الآداب- جامعة تعز

ملخص البحث

تُعد دراسة تغيرات الغطاء الأرضي والتنبؤ باتجاهاتها المستقبلية باستخدام تقنيات الاستشعار عن بُعد والتعلم الآلي من الأدوات المهمة للتخطيط البيئي المستدام. وتتركز هذه الدراسة على حوض وادي الضباب، أحد المصادر الرئيسة للمياه والمنتجات الزراعية لمدينة تعز، بهدف تحليل تغيرات الغطاء الأرضي خلال الفترتين (2000-2012م) و(2012-2024م)، والتنبؤ بحالته المستقبلية حتى عام (2045م).

اعتمدت الدراسة على بيئة (Google Earth Engine (GEE وخوارزمية أشجار التصنيف والانحدار (CART) لتصنيف صور Landsat للأعوام 2000م و2012م و2024م، وإنتاج خرائط الغطاء الأرضي. وبلغت دقة التصنيف (94%)، بينما استخدم نموذج سلاسل ماركوف (Markov Chains) لتحليل التغيرات والتنبؤ المستقبلي، محققاً دقة كلية بلغت (98%) ومعامل كابتا (97%).

أظهرت النتائج وجود خمسة أصناف للغطاء الأرضي: الأراضي الجرداء، الزراعية، النبات الطبيعي، المبنية، والمختلطة. وسجلت الأراضي الزراعية ارتفاعاً في نسبة التغير من (27.5%) إلى (39.5%) نتيجة التوسع الزراعي، خاصة زراعة القات، كما ارتفعت الأراضي المبنية من (1.6 كم²) إلى (2.4 كم²) بزيادة (+0.8 كم²) بفعل النمو السكاني وتطور البنية التحتية. في المقابل، انخفضت نسبة الأراضي المختلطة من (12.7%) إلى (12.2%)، وارتفعت نسبة التغير في الأراضي الجرداء من (8.2%) إلى (11.3%)، بينما ارتفعت نسبة التغير في أراضي النبات الطبيعي من (10.7%) إلى (20%)، مما يشير إلى تراجع استقرارها تحت تأثير الرعي الجائر والتوسع الزراعي.

وخلصت الدراسة إلى مجموعة من التوصيات الهادفة إلى تعزيز الإدارة المستدامة للغطاء الأرضي والحد من الآثار البيئية السلبية للتغيرات الراهنة والمستقبلية.

الكلمات المفتاحية: أصناف، تغيرات الغطاء الأرضي، منصة Google Earth Engine، خوارزمية التصنيف وأشجار الانحدار (CART)، التنبؤ المستقبلي.

Machine learning and the GEE platform in modeling environmental changes in land cover in Wadi Al-Dhabab - Taiz Governorate as a model

Dr. Tahani Abbas Ahmed Aqlan

Assistant Professor of Natural Geography- Dep. of Geography and GIS- Faculty of Arts- Taiz University

Abstract

The study of land cover changes and the prediction of their future trends using remote sensing and machine learning techniques constitute important tools for sustainable environmental planning. This study focuses on the Wadi Al-Dabab Basin, one of the primary sources of water and agricultural products for Taiz City, with the aim of analyzing land cover changes during the periods 2000–2012 and 2012–2024, and predicting its future condition up to the year 2045.

The study employed the Google Earth Engine (GEE) platform and the Classification and Regression Trees (CART) algorithm to classify Landsat imagery acquired in 2000, 2012, and 2024 and to produce land cover maps. The classification achieved an overall accuracy of 94%. Markov Chain modeling was then applied to analyze land cover transitions and predict future changes, yielding an overall prediction accuracy of 98% and a Kappa coefficient of 97%.

The results identified five land cover classes: barren land, agricultural land, natural vegetation, built-up land, and mixed land. Agricultural land exhibited an increase in the change rate from 27.5% to 39.5%, mainly due to agricultural expansion, particularly qat cultivation. Built-up land increased from 1.6 km² to 2.4 km², representing a gain of 0.8 km², driven by population growth and infrastructure development. In contrast, mixed land decreased from 12.7% to 12.2%, while the change rate of barren land increased from 8.2% to 11.3%. Furthermore, the change rate of natural vegetation increased from 10.7% to 20%, indicating a decline in its stability as a result of overgrazing and agricultural expansion.

The study concludes with a set of recommendations aimed at promoting sustainable land cover management and mitigating the negative environmental impacts associated with current and future LC changes.

Keywords: LC classes, land cover change, Google Earth Engine (GEE), Classification and Regression Trees (CART), future prediction.

المقدمة

تُعدُّ منطقة الدراسة من أهم الأودية الزراعية في محافظة تعز، إذ تمثل سلة غذائية ومصدرًا رئيسيًا للمياه لمدينة تعز، وهي المتنفس الطبيعي لسكان المدينة، وتتأثر هذه المنطقة بتفاعل مجموعة من العوامل البيئية والاجتماعية والاقتصادية والسياسية التي أسهمت في إحداث تغيرات في خصائص سطح الأرض. ومن المعروف أن تأثير الإنسان على البيئة لا يتوزع بشكل متساوٍ أو منتظم على المساحات الجغرافية، كما أن هذه التغيرات أدت إلى اضطراب العلاقة الاقتصادية بين منطقة الدراسة ومدينة تعز، نتيجة تقلص الرقعة الزراعية وانخفاض الإنتاج الزراعي والمائي الذي تعتمد عليه المدينة بشكل أساسي.

وبعدُ إنتاج معلومات دقيقة ومحدثة عن تغير الغطاء الأرضي باستخدام نماذج تغيرات الغطاء الأرضي طريقة فعالة لتحديد البصمة البشرية الحالية على الأرض (Parker, 2002)، لذلك تركز الدراسة على الاستفادة من إمكانيات (GEE) Google Earth Engine في التعلم الآلي الذي يعمل على حل المشكلات الأكثر أهمية وتعقيدًا فيما يتعلق برسم خرائط الغطاء الأرضي للمناطق كبيرة المساحة، إذ يمكن للمستخدمين تحليل جميع الصور المتاحة المستشعرة عن بعد باستخدام محرر أكواد بيئة التطوير المتكاملة (IDE) القائم على الويب دون تنزيل هذه البيانات على الجهاز المحلي، وبهذه الطريقة يمكن للمستخدمين الوصول بسهولة إلى كميات كبيرة من البيانات واختيارها، ومعالجتها لمنطقة دراسة كبيرة (Gorelick, et al., 2017). إلى جانب المعالجة السريعة يوجد جانب آخر مهم يجعل (GEE) أكثر شيوعًا وهو توفر العديد من الحزم مع الكثير من الخوارزميات التي تبسط الوصول إلى أدوات الاستشعار عن بعد مثل مصنف (CART)، الذي يعد وسيلة فعالة لتصنيف الغطاءات الأرضية ويعطي نتائج عالية الدقة بناءً على بيانات القمر الاصطناعي لاندسات متعدد المتغيرات، وهو من أهم نُهج تعلم الآلة استخدامًا في تطبيقات الاستشعار عن بعد للتصنيف المراقب الذي يتميز بالسرعة والدقة في التنبؤ ببيانات جديدة.

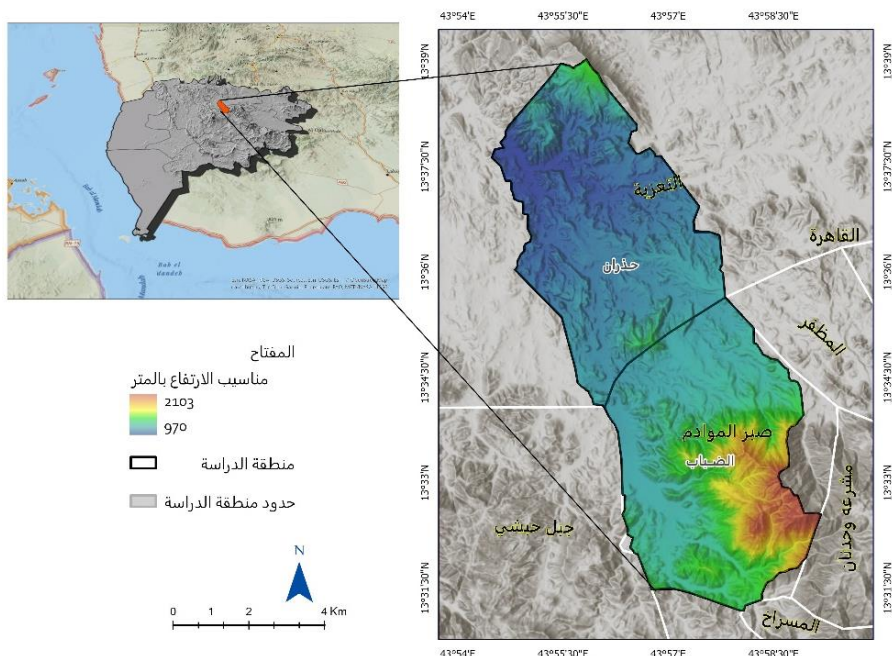
تمثل هذه الدراسة نموذجاً تحليلياً قابلاً للتطبيق على أي منطقة بمحافظة تعز، والمحافظات اليمنية الأخرى، نظراً لاعتمادها على بيانات مفتوحة المصدر.

التعريف بمنطقة الدراسة (Study Area Description):

– **الموقع الجغرافي:** تقع منطقة الدراسة جغرافياً في جنوب غرب مدينة تعز، وضمن مديرتي صبر الموادم والتعزية، بين خطي طول ($43^{\circ} 59' 30''$ و $43^{\circ} 54' 30''$)، ودائرتي عرض ($13^{\circ} 39' 00''$ و $13^{\circ} 31' 00''$). ومن الناحية الجيومورفولوجية تدخل منطقة الدراسة ضمن المرتفعات الغربية للجمهورية اليمنية، وتتخللها مظاهر تضاريسية متعددة كالأراضي المنبسطة ذات التربة الخصبة، وبعض الجبال، والتلال، ويتراوح ارتفاعها بين (970 – 2103 متر). (الخريطة 1).

– **الحدود الإدارية:** يحدها من الشرق مديريات مشرعة وحدثان، والمظفر، والتعزية، ومن الشمال والغرب مديرتي التعزية وجبل حبشي على التوالي، ومن الجنوب جزء من مديرتي صبر الموادم والمسراخ.

الخريطة رقم (1) الموقع الجغرافي لمنطقة الدراسة



المصدر: الباحثة بالاعتماد على نموذج FABDEM وبرنامج ArcGIS Pro

- **التقسيم الإداري:** تتكون إداريًا من عزلتي الضباب وحذران، بمساحة قدرها (59,4 كم²) (قياسات الباحثة)، وتضم (135) قرية (نتائج تعداد 2004م).
- **السكان:** بلغ عدد السكان (4364) نسمة (التعداد السكاني، 2004)، ووفقًا للإسقاطات السكانية لعام (2024م) بلغت أعدادهم حوالي (20,897) نسمة.
- **الهيدرولوجيا:** تحتوي منطقة الدراسة على شبكة مائية تبدأ من منابعها من جبل صبر وجبل حبشي، وتجري مياهها في الفصول الممطرة بغزارة، ويقل الجريان السطحي في وادي الضباب في فصول الجفاف، نتيجة للسحب العشوائي للمياه السطحية والجوفية من قبل المزارعين لري المحاصيل الزراعية، ولري محصول القات.

أهمية الدراسة (Significance of the Study):

تأتي أهمية هذه الدراسة من كونها ضمن العلوم التي تقدم إسهامًا معرفيًا وتطبيقيًا، فمن حيث الإسهام المعرفي تحتوي منطقة الدراسة على منظومة بيئية متكاملة من الغطاءات الأرضية، والمظاهر البشرية. وتحدث تغيرات الغطاء الأرضي في الغالب جراء التعديلات التي يقوم بها الإنسان في بيئته كالتوسع العمراني، وسوء استغلال النبات الطبيعي (التحطيب والرعي الجائر)، أو استبدال بعض أنواع المحاصيل الزراعية بمحاصيل أخرى تؤدي إلى إجهاد التربة، واستنزاف المياه السطحية والجوفية، مثل زراعة القات، الأمر الذي يزيد من فرص التدهور البيئي على المدى القريب والبعيد، وأما تطبيقياً فتشمل الدراسة التعلم الآلي وبعض النماذج التي تساعد في كشف تغيرات الغطاء الأرضي، والتنبؤ المستقبلي له، وتشمل كذلك الحلول والمعالجات التي تتضمن الآليات والسياسات للتخفيف من أضرار التغيرات البيئية حاضراً ومستقبلاً.

مبررات الدراسة (Study Justifications):

- **ردف المكتبات اليمنية بالدراسات الجغرافية في مجال التغيرات البيئية، نظرًا لقلة الدراسات والأبحاث العلمية اليمنية المختصة بهذا المجال لا سيما في مجال الحوسبة السحابية (GEE)، وتقنيات التعلم الآلي، والذكاء الاصطناعي.**
- **المساهمة في حماية الموارد الطبيعية لمنطقة الدراسة وتوعية السكان لأهمية الحفاظ عليها للأجيال القادمة.**

- كما تشكل الدراسة أنموذجاً للأبحاث الحديثة التي تستخدم فيها الاتجاهات الحديثة في جغرافية البيئة، وإبراز جوانبها التطبيقية النفعية وطرق استدامتها.

أهداف الدراسة (Study Objectives):

- كشف تغيرات الغطاء الأرضي وتحليلها وتقييمها في ضوء علاقاتها الزمكانية، وتأثيراتها البيئية أثناء المدة الزمنية (2000، 2012، 2024م).
- تحليل اتجاهات التغيرات المستقبلية للغطاء الأرضي حتى عام (2045م) لأجل إدارتها بطرق سليمة، والحفاظ على المنظومة البيئية من التدهور والأضرار السلبية، ومحاولة إيجاد الحلول المناسبة لها.
- الاستفادة من إمكانية تطبيق هذا النوع من الدراسات على محافظة تعز وبقية المحافظات حفاظاً على الغطاءات الأرضية؛ ولتفادي المشكلات البيئية الناتجة عن تلك التغيرات.
- إبراز أهمية استخدام التقنيات الحديثة مثل التعلم الآلي (ML)، ومنصة (GEE)، والخوارزميات المتعددة، نظراً لسهولة استخدامها وسرعة نتائجها ودقتها العالية حتى مع البيانات الضخمة، وتكاملها مع البرامج الأخرى وسهولة التنبؤ المستقبلي بالغطاء الأرضي.

مشكلة الدراسة (Problem Statement):

- تتعلق مشكلة الدراسة بالسؤال الرئيس: ما العوامل المؤثرة على الغطاء الأرضي والتي تؤدي إلى حدوث التغيرات المستمرة عليه في منطقة الدراسة؟
- الأسئلة التي تجيب عليها الدراسة:

- ما مدى الضرر البيئي الناتج عن التغيرات الحاصلة على الغطاء الأرضي في الوقت الحاضر؟
- هل تسهم التغيرات المستقبلية في تدهور التربة الزراعية وزيادة التصحر بفعل التغيرات المناخية والتوسع العمراني العشوائي؟
- هل يمكن الحد من مسببات التغيرات لا سيما البشرية منها؟
- ما مدى فاعلية التعلم الآلي في كشف التغيرات الأرضية والتنبؤ بها في المناطق الواسعة والأكثر تضرراً؟

حدود الدراسة (Study Limitations):

- الحدود المكانية: تتمثل بالحدود الإدارية لمنطقة الدراسة ممثلة بعزلتي (الضباب وحذران) وما يجاورها في محافظة تعز.
- الحدود الزمانية: وتتمثل في المدد الزمنية (2000 - 2012 - 2024م) وعام التنبؤ (2045م).
- الحدود الموضوعية: تتركز في تحليل مقومات وآليات تطبيق نماذج تغيرات الغطاء الأرضي، وسبل معالجتها، ووضع الإجراءات الكفيلة بحماية الغطاء الأرضي من التدهور والأضرار البيئية.

الدراسات السابقة (Previous Studies):

تُعد هذه الدراسة من الدراسات المحدودة في اليمن التي تناولت تغيرات الغطاء الأرضي، رغم الانتشار الواسع لهذا النوع من الدراسات عربياً وعالمياً لأهميته في فهم التغيرات البيئية ودعم التخطيط المستدام.

- الدراسات المحلية:

1. دراسة (عقلان، 2023): أظهرت هذه الدراسة تغيرات واضحة في الغطاء الأرضي بحوض وادي بنا الأعلى خلال المدة 1989-2022، حيث تبين أن العوامل البشرية مثل التوسع العمراني والاستعمالات غير المخططة للأرض كانت السبب الرئيس لهذه التغيرات، تلاها التأثيرات الطبيعية. وقد استخدمت الدراسة تقنيات الجيوماتكس وخوارزمية آلة متجه الدعم (SVM) مع تصنيف أندرسون المحدث (NLCD)، إضافة إلى أدوات التحليل المتقدمة في ArcGIS Pro و TerrSet، ونماذج الأوتوماتا الخلوية وسلسلة ماركوف في نمذجة التنبؤ بالغطاء الأرضي المستقبلي. وأسهمت نتائج الدراسة في تقديم توصيات علمية تهدف إلى حماية الغطاء الأرضي من التدهور وتعزيز استدامته.

2. دراسة (الشرفي، 2019)، ركزت هذه الدراسة على مدينة إب بمحافظة إب، وبيّنت أن التوسع العمراني والاستخدامات البشرية العشوائية للأراضي الزراعية والنبات الطبيعي أدى إلى تقلص الأراضي الزراعية، وتدهور نوعية المياه الجوفية، كما أدى إلى تشويه المنظر الجمالي للجبال، وبالتالي أثر سلبياً على السياحة. وتؤكد الدراسة

ضرورة تطبيق المخطط العام للأراضي الزراعية والمناطق الطبيعية للحفاظ على الموارد الطبيعية ومنع التدهور البيئي الناتج عن الأنشطة البشرية.

- **الربط التحليلي بين الدراسات المحلية،** تظهر كل من دراسة عقلان والشرفي أن التغيرات في الغطاء الأرضي في اليمن تتأثر بشكل كبير بالعوامل البشرية، مع وجود دور أقل للعوامل الطبيعية، وأن التوسع العمراني والاستخدام غير المخطط للأراضي يشكل تهديدًا رئيسيًا للبيئة، مما يوضح الحاجة الملحة إلى تطبيق استراتيجيات إدارة الأراضي المستدامة.

- **الدراسات العربية:**

1. **دراسة (العيسوي، 2021)** ناقشت هذه الدراسة التغيرات في أنماط الغطاء الأرضي في قضاء الفلوجة بالعراق، خلال المدة 1980-2020، موضحة الدور المشترك للعوامل الطبيعية والبشرية في هذه التغيرات. وأظهرت الدراسة أن الجيولوجيا والمناخ والتضاريس والانحدارات تلعب دورًا بارزًا إلى جانب النشاطات البشرية، مع تقديم توصيات للتخفيف من الآثار البيئية الناتجة عن تغيرات الغطاء الأرضي باستخدام تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية الحديثة.

2. **دراسة (المحمد وآخرون 2018)** ركزت هذه الدراسة على حوض وادي العرب في الأردن خلال المدة 1984-2015، حيث بينت أن أكثر المناطق انخفاضًا في الغطاء النباتي تقع في الغرب بعد بحيرة السد، بينما سجلت مناطق الوسط والشرق زيادة طفيفة في الغطاء. وأكدت الدراسة على أهمية استخدام خرائط توزيع الغطاء النباتي المستمدة من المؤشرات الطيفية لدعم التخطيط البيئي والزراعي، وفهم العلاقة بين التغيرات البيئية والاستعمالات البشرية للأرض.

- **الربط التحليلي بين الدراسات العربية،** تؤكد الدراسات العربية على الدور المركب للعوامل البشرية والطبيعية في تغيرات الغطاء الأرضي، مع أهمية الاستفادة من تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية في تحليل التغيرات ومراقبتها، وهو ما يتوافق مع نتائج الدراسات المحلية، كما يوضح أن هذه العلاقة بين الإنسان والبيئة تتسم بالتعقيد وتحتاج إلى أدوات تحليلية دقيقة.

– الدراسات العالمية:

1. (Auwalu Faisal Koko, et al, 2022)، أجرى Auwalu Faisal Koko وآخرون (2022) دراسة في مدينة كانو متروبوليس بنيجيريا خلال المدة 1991-2020 لتحليل ديناميكيات تغير الغطاء الأرضي واستعمالات الأراضي والتنبؤ بها لعامي 2035 و2050. وأظهرت النتائج انخفاض الأراضي القاحلة وزيادة المناطق المبنية مع توقع استمرار هذا الاتجاه بفعل النمو الحضري السريع. وأكدت الدراسة أهمية نماذج (CA-Markov) وتقنيات نظم المعلومات الجغرافية في تحسين دقة التنبؤ ودعم التخطيط الحضري والاستخدام المستدام للأراضي.

2. (منظمة الفاو، 2005)، قدمت منظمة الفاو مجموعة شاملة من الدراسات حول تصنيف الغطاء الأرضي، مع توحيد المفاهيم والمعايير لتلبية احتياجات المستخدمين المختلفين على المستوى العالمي. وشملت الدراسة تطوير نظام تصنيف مرجعي يمكن تطبيقه على أي نوع من الغطاء الأرضي، يسهل استخدامه من قبل مختلف الجهات، مع الربط بين التصنيفات ومفاتيح الخرائط المتاحة لضمان المقارنة وإيجاد العلاقات بين البيانات المختلفة.

–الربط التحليلي بين الدراسات العالمية، تُظهر الدراسات العالمية أهمية النماذج التحليلية وأنظمة التصنيف الموحدة لفهم تغيرات الغطاء الأرضي على نطاق واسع، وهو ما يعزز إمكانية المقارنة بين المواقع المختلفة، ويوفر أدوات دقيقة للتنبؤ، ما يدعم الجوانب التخطيطية والعلمية التي يمكن الاستفادة منها في دراسة الغطاء الأرضي في اليمن.

تؤكد الدراسات السابقة أهمية تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية في تحليل تغيرات الغطاء الأرضي وفهم تأثير العوامل البشرية والطبيعية فيها. كما تبرز الحاجة إلى تطبيق هذه الأساليب في اليمن لتقييم الواقع البيئي والتنبؤ بالتغيرات المستقبلية، بما يدعم التخطيط المستدام وإدارة الموارد الطبيعية، ويوفر أساساً معرفياً للدراسة الحالية.

– الإضافة المنهجية الجديدة للدراسة الحالية:

تعدُّ هذه الدراسة أول دراسة متكاملة -على المستوى اليمني- تستخدم منصة Google Earth Engine وخوارزمية CART ونمذجة سلاسل ماركوف في حوض

وادي الضباب بمحافظة تعز، متضمنة التنبؤ حتى عام 2045. وعلى المستوى العربي، تحقق دقة تصنيف (94%) ومعامل كبا (97%) تفوق معظم الدراسات العربية المماثلة، مع التطبيق في تضاريس جبلية صعبة. وعلى المستوى الدولي، تعدّ من أوائل الدراسات التي تستخدم CART داخل GEE ليس فقط للتصنيف بل للتنبؤ المستقبلي أيضاً، مع ربط نظري بين معامل Gini impurity ونموذج الاحتمالات الانتقالية، وإثبات فعالية الحوسبة السحابية في بيئة محدودة الموارد، ويعد النموذج قابلاً للتطبيق على أي بيئة يمنية.

الإجراءات المتبعة في الدراسة (Methodology):

اعتمدت الدراسة على منهجية متكاملة تجمع بين التحليل الرقمي للبيانات الفضائية والتحقق الميداني، بهدف رصد وتحليل التغيرات في الغطاء الأرضي والتنبؤ بأنماطه المستقبلية حتى عام (2045م).

مناهج الدراسة (Research Approaches)

- **المنهج الأيكولوجي (البيئي) (Ecological Approach):** يستخدم في الربط والتحليل والتعليل للظواهر الجغرافية المختلفة، ثم تقويمها وفق قيمتها البيئية والاقتصادية؛ بحيث يربط بين الأسلوب البشري المتبع حالياً في استغلال موارد البيئة، ويسهم في وضع خطط وبرامج تهدف إلى صيانة هذه الموارد، والمحافظة عليها وتحقيق التوازن البيئي في منطقة الدراسة.

- **منهج التحليل (الزماني - المكاني) (Spatio-Temporal Analysis Approach):** اعتمدت الدراسة منهج التحليل الزماني-المكاني الذي يُعنى بدراسة التغيرات الجغرافية عبر الزمن وتحليل أبعادها المكانية (الدليمي، 2007؛ العثمان، 2009). وقد استُخدم هذا المنهج في تحليل المرئيات الفضائية ورصد تغيرات الغطاء الأرضي بمنطقة الدراسة.

أدوات ومنهجية جمع وتحليل البيانات (Research Methodology)

- **أسلوب التحليلي المكاني (Spatial Analysis Method):** ويستخدم لإظهار التباين في أصناف الغطاء الأرضي والتطور الذي حدث له في المدة (2000-

(2024م)، باستخدام المرئيات الفضائية، والنماذج والمؤشرات في بيئة (GEE) لمعرفة التغيرات الزمنية، وذلك بإجراء المقارنة الزمنية بين المدد المذكورة، والتنبؤ المستقبلي لتطور الظاهرة.

- **الأسلوب الكمي (Quantitative Method):** يتطلب المنهج الكمي في الجغرافيا الاستعانة بالإحصاء والرياضيات واستعمال النماذج والنظم التي تعتمد على القياس والتحليل واستعمال الأرقام للوصول إلى نتائج موضوعية دقيقة ومحددة (الصالح، والسرياني، 2000)، وتمثل ذلك في عرض البيانات -بهيئة مجدولة رقمية كانت أو وصفية، زمانية أو مكانية- التي تشكل قاعدة بيانات مبنية على أساس التحليل الرقمي لبيانات الاستشعار عن بعد واستنباط المعلومات، واستخراج نتائج التحليلات ودرجة موثوقيتها والمساعدة في عمليات التنبؤ وفق النماذج الإحصائية المستخدمة في معالجة الأشكال الأرضية بطرق آلية، مثل استخراج خرائط الغطاء الأرضي، والتنبؤ المستقبلي بها.

- **مصادر البيانات (Data Sources):** اعتمدت الدراسة على بيانات Google Earth Engine (GEE) (*) وهي عبارة عن منصة تحليل جغرافي مكاني تعتمد على السحابة، وتتيح للمستخدمين تحليل صور الأقمار الصناعية لسطح الأرض، وتستخدم لغة (JavaScript)، وتستخدم هذه المنصة لأبحاث الاستشعار عن بعد، والتنبؤ بتفشي الأمراض، وإدارة الموارد الطبيعية، وغيرها. هذه المنصة تجمع بين أكثر من 40 عامًا من صور الأقمار الصناعية العالمية التاريخية والحالية، والأدوات والقوة الحسابية اللازمة لتحليل واستخراج هذا المستودع الضخم من البيانات، إضافة إلى احتوائه على مشروع Timelapse (الفاصل الزمني) الذي يعمل على إنشاء عارض تفاعلي يُظهر تغيرات تغطية الأرض العالمية الخالية من السحب على مدار 32 عامًا (GEE, 2024).

تحتوي منصة (GEE) على قدر كبير من أنظمة مراقبة الأرض المستخدمة على نطاق واسع مثل الأقمار الاصطناعية MODIS، و Landsat، و Sentinel،

بالإضافة إلى منصات جغرافية مكانية مختلفة تشمل البيانات الديموغرافية والمناخية، وتطل إحدى المزايا الرئيسية لها سهولة الاستخدام وتوافر المكتبة الموحدة للبيانات العالمية المستشعرة عن بعد، ويمكن الوصول إلى صور Landsat في GEE من خلال USGS (هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية) (Xie, et al., 2019)، واشتملت الدراسة على مصدرين رئيسيين للبيانات:

- **البيانات الفضائية:** تم الاعتماد على صور الأقمار الصناعية من سلسلة Landsat بمتحسساتها المختلفة (ETM+, TM, OLI/TIRS-2) للأعوام (2000، 2012، 2024م).

- **نموذج ارتفاعات رقمية FABDEM:** بدقة 30 مترًا، وهو نموذج ارتفاع رقمي عالمي محسن (DEM) يعبر عن سطح الأرض الحقيقي بعد إزالة تأثير الأشجار والمباني، بالاعتماد على بيانات Copernicus Programme

- **البيانات المناخية:** استُخدمت البيانات المناخية التاريخية الشهرية (درجة الحرارة ومعدل هطول الأمطار) من النموذج ERA5-Land Monthly Averaged التابع لبرنامج كوبرنيكوس لمراقبة المناخ والمدعوم من وكالة الفضاء الأوروبية، تميزت هذه البيانات بدقة مكانية عالية تبلغ حوالي (9 كم²) للبكسل.

الإجراءات المنهجية (Methodological Procedures):

المعالجة الرقمية للصور وتصنيف الغطاء الأرضي: وتمت بالمرحل التالية:

1) إعداد السلسلة الزمنية واختيار عينات التدريب:

- **إعداد السلسلة الزمنية:** أنشئت سلسلة زمنية متسقة من الصور الفضائية لمنطقة الدراسة بدقة بلغت 30 مترًا.

- **اختيار عينات التدريب:** طُبقت طريقة التصنيف الموجّه، حيث تم اختيار مجموعة من عينات التدريب الممثلة لفئات الغطاء الأرضي الخمس المطلوبة (الأراضي الزراعية، الأراضي الجرداء، الأراضي المختلطة، النبات الطبيعي، الأراضي المبنية). استُخدمت هذه العينات بعد ذلك لتدريب الخوارزمية على تمييز هذه الفئات في كافة الصور.

(2) تصنيف الغطاء الأرضي باستخدام خوارزمية CART (CART-based Land Cover Classification):

أُجريت عملية التصنيف على منصة Google Earth Engine (GEE) باستخدام خوارزمية شجرة التصنيف والانحدار (CART)، وهي إحدى خوارزميات أشجار القرار التي طُوِّرت بواسطة (Breiman et al., 1984)، وتُستخدم في حل مشكلات التصنيف والانحدار والتنبؤ ضمن التعلم الآلي الخاضع للإشراف. وتتميز بقدرتها على التعامل مع البيانات الفئوية والمستمرة، وسهولة تفسير نتائجها، واكتشاف العلاقات غير الخطية بين المتغيرات.

تعتمد الخوارزمية على تقسيم بيانات التدريب تكرارياً إلى مجموعات فرعية باستخدام الانقسامات الثنائية، بدءاً من العقدة الجذرية حتى الوصول إلى عقد طرفية تحقق شروط التوقف المحددة، ثم تُستخدم الشجرة الناتجة لتصنيف البيانات أو التنبؤ بها استناداً إلى فئة الأغلبية في العقد الورقية. (Ayush & Gaurav, 2023)

كما تُستخدم شجرة الانحدار للتنبؤ بالقيم المستمرة من خلال تقسيم البيانات إلى مناطق فرعية يُمثل كل منها متوسط قيم المتغير المستهدف (Breiman et al., 1984؛ James et al., 2021)، ونظراً لحساسية أشجار القرار للتغيرات البسيطة في البيانات، يمكن تحسين دقة التنبؤ من خلال الاستفادة من هذا التباين في بناء نماذج أكثر كفاءة (Martin & Naomi, 2017).

- مبررات اختيار خوارزمية CART:

جاء اختيار خوارزمية CART لكونها من أكثر خوارزميات التعلم الآلي بساطةً ووضوحاً في تفسير نتائج التصنيف، إذ تعتمد على بناء شجرة قرارات تُقسّم البيانات إلى مجموعات متجانسة استناداً إلى القيم المثلى للمتغيرات المدخلة. وتتميز هذه الخوارزمية بخصائص عدة تجعلها مناسبة لدراسات تصنيف الغطاء الأرضي، من أهمها:

- **سهولة التفسير (Interpretability):** توفر الخوارزمية نموذجاً واضحاً في صورة شجرة قرارات يمكن تتبع خطواتها وفهم آلية اتخاذ القرار التصنيفي. وتكتسب هذه الميزة أهمية خاصة في الدراسات الأكاديمية التي تتطلب تفسيراً علمياً للنتائج، وليس مجرد تحقيق أعلى مستوى من الدقة.

- **عدم الحاجة إلى افتراضات إحصائية مسبقة:** لا تشترط الخوارزمية أن تتبع البيانات توزيعاً طبيعياً، كما أن لديها قدرة على التعامل مع العلاقات غير الخطية بين المتغيرات الطيفية وفئات الغطاء الأرضي.
- **القدرة على التعامل مع البيانات متعددة المصادر:** يمكن دمج الحزم الطيفية والمؤشرات النباتية والبيانات الطبوغرافية وغيرها من المتغيرات في نموذج واحد دون الحاجة إلى إجراءات معالجة معقدة.
- **الكفاءة الحسابية:** تتميز الخوارزمية بسرعة التدريب والتنفيذ مقارنة ببعض الخوارزميات الأخرى، وهو ما يُعدُّ مهماً عند معالجة صور الأقمار الصناعية والبيانات المكانية واسعة النطاق.
- **تحديد المتغيرات الأكثر أهمية:** تساعد الخوارزمية في تحديد المتغيرات الأكثر إسهاماً في عملية التصنيف، مما يضيف قيمة تفسيرية للنتائج ويسهم في فهم العوامل المؤثرة في توزيع فئات الغطاء الأرضي.

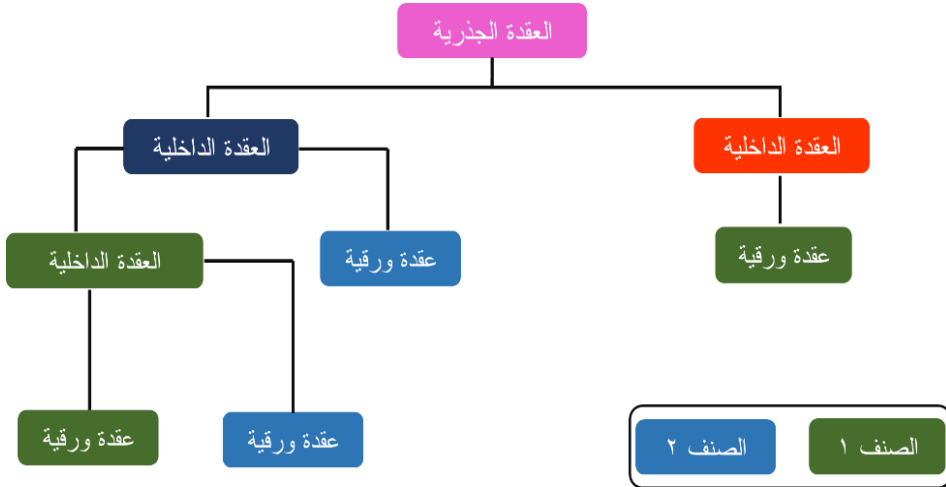
وعلى الرغم من أن بعض الخوارزميات الحديثة، مثل Random Forest و Support Vector Machine (SVM) قد تحقق مستويات أعلى من الدقة في بعض التطبيقات، إلا أنها تتسم بدرجة أكبر من التعقيد وتتطلب إعداداً وضبطاً لعدد من المعلمات التشغيلية، فضلاً عن محدودية إمكانية تفسير آلية اتخاذ القرار مقارنةً بخوارزمية CART. ، ومن ثم لم يستند اختيار خوارزمية CART في هذه الدراسة إلى كفاءتها التصنيفية فحسب، بل إلى ما توفره أيضاً من وضوح وشفافية في تفسير النتائج بما يتوافق مع الأهداف العلمية للدراسة الرامية إلى تحليل أنماط الغطاء الأرضي وفهم العوامل المؤثرة فيها بصورة منهجية.

تعتمد خوارزمية CART على معامل شائبة جيني (Gini Impurity) لتحديد أفضل تقسيم للبيانات من خلال اختيار العقد الأكثر تجانساً والأقل شوائباً، وذلك بحساب المتوسط المرجح لشوائب جيني واختيار القيمة التي تحقق أدنى مستوى من الشوائب. أما في حالة الانحدار، فيُستخدم التباين أو مجموع المتبقيات التربيعية بدلاً من معامل جيني لقياس درجة التجانس داخل العقد (Esri, 2024, geeksforgeeks, 2024)، ويُحسب معامل شائبة جيني باستخدام المعادلة الآتية:

$$Gini\ Impurity = 1 - \sum_{i=1}^k p_i^2$$

حيث: K هو عدد فئات التصنيف
و p_i هي نسبة العينات في الفئة i.

الشكل رقم (1) آلية عمل شجرة التصنيف والانحدار (CART)



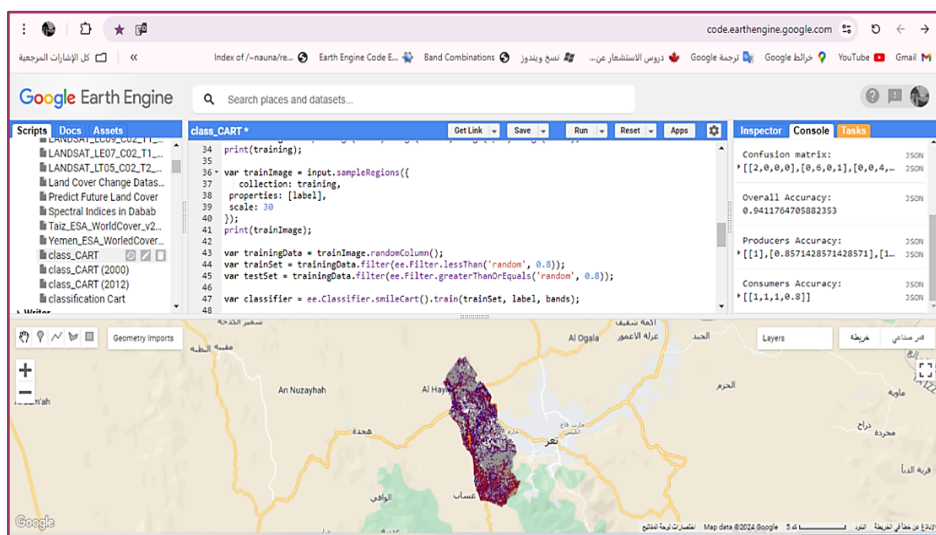
(3) تقييم دقة التصنيف (Accuracy Assessment of the Classification):

بعد الانتهاء من عملية التصنيف لا بد من تقييم موثوقية النتائج للصور المصنفة، حيث تم إجراء تقييم دقة التصنيف من خلال إنشاء مصفوفة الخطأ (Confusion Matrix) باستخدام عينات تحقق مستقلة لم تُستخدم في عملية التدريب، وقد وفرت هذه العملية مقاييس كمية للدقة مثل الدقة الإجمالية ومعامل كابا، وبلغت دقة النموذج (94%) (الشكل 2)، يمكن تفسير الارتفاع الملحوظ في دقة التصنيف بمجموعة من العوامل المنهجية والفنية المتكاملة، يأتي في مقدمتها الاعتماد على منصة GEE التي توفر بيئة حوسبة سحابية متقدمة وقواعد بيانات مكانية موثوقة، مما أسهم في تحسين جودة معالجة المراثيات الفضائية وتقليل الأخطاء المرتبطة بالمعالجة التقليدية للبيانات، كما أسهم اختيار صور Landsat المناسبة للفترة الزمنية المدروسة، واعتماد عينات تدريبية ممثلة لفئات الغطاء الأرضي المختلفة في تعزيز قدرة النموذج على التمييز بين

التعلم الآلي ومنصة GEE في نمذجة التغيرات البيئية للغطاء الأرضي بوادي الضباب ... د/ تهاني عباس أحمد عقلان

الفئات التصنيفية بدقة مرتفعة، ويُعزى جانب من هذه الدقة أيضًا إلى ملائمة خوارزمية CART لطبيعة بيانات الدراسة، لما تتميز به من قدرة على التعامل مع العلاقات غير الخطية بين المتغيرات الطيفية والخصائص المكانية لفئات الغطاء الأرضي.

الشكل رقم (2) نتائج تقييم دقة التصنيف لخوارزمية (CART) للأعوام (2000 و2012 و2024م)



4) نمذجة كشف التغير والتنبؤ المستقبلي للغطاء الأرضي

4-1 كشف تغير الغطاء الأرضي في بيئة (GEE) (LCC Detection):

يُعرّف اكتشاف التغير بأنه عملية تحديد التحولات في حالة كائن أو ظاهرة على فترات زمنية مختلفة، وهو ضروري لفهم العلاقات والتفاعلات بين الظواهر الطبيعية والبشرية وتعزيز اتخاذ القرار (Singh, 1989)، تتطلب هذه العملية تحليل التغيرات التي تحدث في منطقة معينة خلال فترة زمنية محددة، باستخدام مجموعات البيانات متعددة الأزمنة (عقلان، 2023).

في هذه الدراسة، تم استخدام السلاسل الزمنية للصور المصنفة للأعوام (2000-2012 و2012-2024) على منصة GEE بهدف تحليل التغيرات في الغطاء الأرضي، وتم إنشاء خريطة توضح التحولات بين فئات الغطاء الأرضي، بالإضافة إلى

إنشاء قاموس يربط بين الألوان والقيم والأسماء للفئات المصنفة مسبقاً، مما يسمح بتمثيل التحولات بشكل دقيق عبر الفترات الزمنية.

تم اعتماد النموذج الاحتمالي لمصفوفة الانتقال (Transition Probability Model) كأداة كمية لتحليل ديناميكيات التغير بين فئات الغطاء الأرضي، حيث يمكن حساب احتمالية تحول أي فئة معينة إلى فئة أخرى خلال فترة زمنية محددة، وقد تم تطبيق النموذج على بيانات الغطاء الأرضي للأعوام 2000 و 2012 و 2024، وهو الأساس المستخدم لاحقاً في التنبؤ المستقبلي للغطاء الأرضي، فيما يلي المعادلات المستخدمة في تحليل التغيرات وفق نموذج مصفوفة الانتقال هي:

$$P(\text{Change}_{ij}) = P(LC_1 = i) \times P(LC_2 = j | LC_1 = i) \times \prod f_k(X_k) \rightarrow (1)$$

$$P(LC_1 = i) = \frac{A(LC_1 = i)}{A_{total}} \rightarrow (2)$$

$$P(LC_2 = j | LC_1 = i) = \frac{A_{i \rightarrow j}}{A(LC_1 = i)} \rightarrow (3)$$

حيث: $P(\text{Change}_{ij})$ الاحتمال الكلي لانتقال الفئة i إلى الفئة j

$P(LC_1 = i)$ الاحتمال الهامشي للفئة الأولى

$P(LC_2 = j | LC_1 = i)$ الاحتمال الشرطي للانتقال

$f_k(X_k)$ دوال محركات التغير (المتغيرات) (الانحدار، القرب من الطرق ...)

$A_{i \rightarrow j}$ مساحة التحول من الفئة i إلى الفئة j بالمتر المربع

A_{total} المساحة الكلية لمنطقة الدراسة

يُنَفَّذ تطبيق نموذج مصفوفة الانتقال الاحتمالية في منصة (GEE) من خلال إعداد خرائط الغطاء الأرضي المصنفة للفترتين الزمنية المدروستين، ثم إنشاء خريطة مركبة تُظهر التحولات بين الفئات المختلفة للغطاء الأرضي (Xiong et al., 2017) بعد ذلك، تُستخدم الدوال التحليلية في المنصة مثل (reduceRegion) لاستخراج عدد البكسلات المنقولة من كل فئة إلى أخرى، وتحويل هذه القيم إلى مصفوفة انتقال احتمالية تمثل ديناميكيات التغير بين الفئات، وتُعد هذه المصفوفة الأساس الكمي الذي يُبنى عليه تحليل التغير الزمني للغطاء الأرضي، وتستخدم لاحقاً في التنبؤ المستقبلي عبر نموذج

ماركوف (Eastman, 2016) (Markov Chain Model) . يتيح هذا النهج فهماً دقيقاً لأنماط التحول المكاني، ويسهم في دعم القرارات التخطيطية والإدارية المبنية على بيانات كمية عالية الدقة.

4-2 التنبؤ المستقبلي بالغطاء الأرضي لعام (2045م) (Future Prediction of Land Cover for the Year 2045):

يُعدّ التنبؤ المستقبلي بالغطاء الأرضي من التطبيقات المتقدمة والمعقدة في مجال التحليل المكاني، إذ يتطلب اتباع منهجيات دقيقة في بناء النماذج المكانية وتدريبها للتحكم في التباين المكاني والزمني للبيانات. وتُسهّم هذه النماذج في تحليل الاتجاهات المستقبلية للتغيرات البيئية ودعم اتخاذ القرارات التخطيطية المستندة إلى بيانات كمية دقيقة.

تعتمد عملية التنبؤ في هذه الدراسة على بيئة (GEE) باستخدام خوارزمية شجرة التصنيف والانحدار (CART) ، التي تُعدّ من أكثر خوارزميات التعلم الآلي كفاءةً في تحليل الأنماط المكانية والتنبؤ بها (Maher et al., 2017) . تم تطبيق خوارزمية CART لمحاكاة التغيرات في الغطاء الأرضي بالاعتماد على بيانات الأعوام 2012 و2024م، ثم تدريب النموذج لتقدير التحولات المستقبلية المتوقعة حتى عام 2045م، مع حساب المساحة الممثلة لكل فئة من فئات الغطاء الأرضي، ويُعدّ هذا النهج خطوة أساسية نحو بناء نموذج تنبؤي مكاني دقيق يدعم قرارات التخطيط البيئي. يصف النموذج الرياضي المستخدم في خوارزمية CART العلاقة التنبؤية بين المتغيرات المدخلة (X) ومخرجات النموذج (f(X)) وفق المعادلة:

$$f(X) = \sum_{m=1}^M c_m \times I(X \in R_m)$$

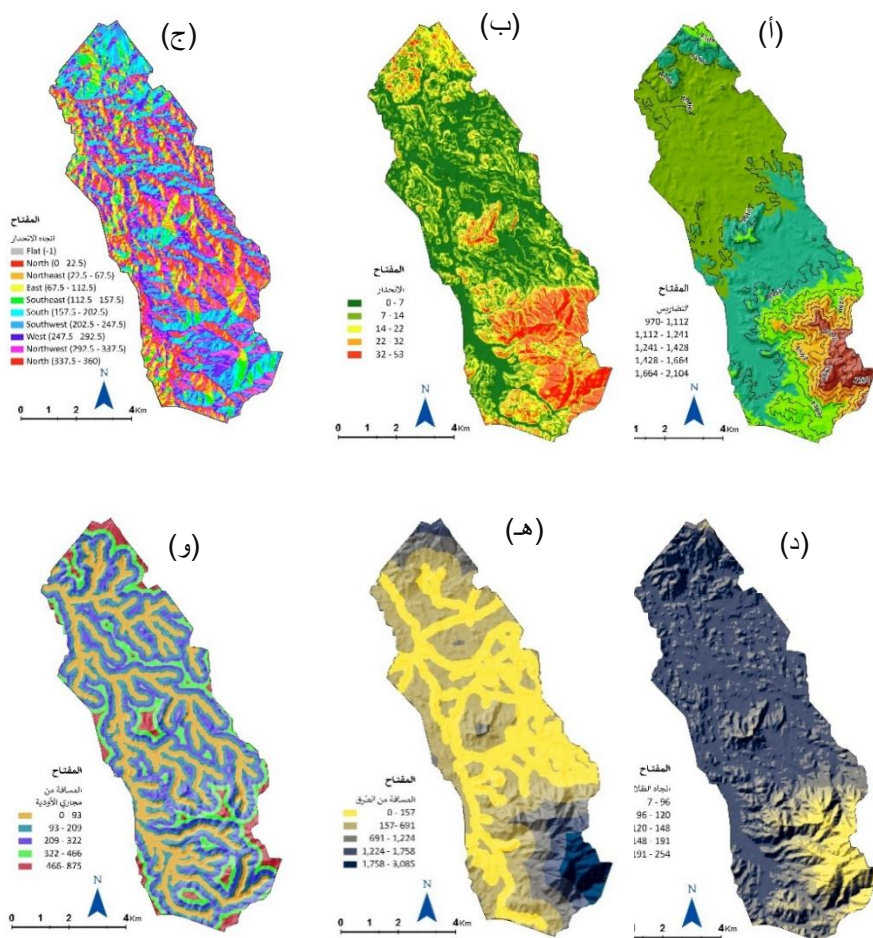
حيث: f(X): ناتج النموذج التنبؤي
R: منطقة القرار (Decision Region) في
الفضاء المكاني

c: القيمة التنبؤية للفئة داخل المنطقة R
I(X ∈ R): دالة المؤشر لتحديد انتماء
النقطة X إلى المنطقة R

تُوضّح المعادلة أن الناتج التنبؤي الكلي هو مجموع القيم التنبؤية الجزئية لكل

منطقة قرار نشأت عن عملية التقسيم الثنائي، بحيث تُفعل دالة المؤشر فقط للنقاط الواقعة ضمن تلك المناطق، يتيح هذا النهج تمثيل العلاقات المكانية المعقدة بين المتغيرات، ما يجعل خوارزمية CART أداة فعالة للتنبؤ المكاني عالي الدقة (Breiman et al., 1984).

الشكل رقم (3) متغيرات النمذجة



(أ) نموذج الارتفاعات الرقمية (DEM)، (ب) الانحدار، (ج) اتجاه الانحدار، (د) اتجاه الظل، (هـ) المسافة من الطريق، (و) المسافة من الأودية.

خطوات تنفيذ التنبؤ المكاني:

- 1- إعداد خرائط الغطاء الأرضي للأعوام (2012 و 2024م)
- 2- إنشاء خريطة التغير بين الفترتين لتحديد مناطق التحول المكاني (اللوحة 2)
- 3- إدخال المتغيرات المساعدة في النمذجة، (الشكل 3) وتشمل:
 - نموذج الارتفاع الرقمي (DEM) والمشتقات الطبوغرافية الانحدار (Slope)، واتجاه الانحدار (Aspect)، واتجاه الظلال (Hillshade)
 - خرائط المسافة من الطرق (Distance to Roads)
 - خرائط المسافة من الأودية (Distance to Rivers)
 - خرائط التغير بين الفترتين (2012-2024م)
 - خريطة قيود النمو العمراني (Urban Growth Constraints)
- 4- تدريب نموذج CART على العلاقات المكانية بين هذه المتغيرات
- 5- تطبيق النموذج المدرب للتنبؤ بتوزيع فئات الغطاء الأرضي للعام 2045م.

عملية التنبؤ (Future Prediction Process):

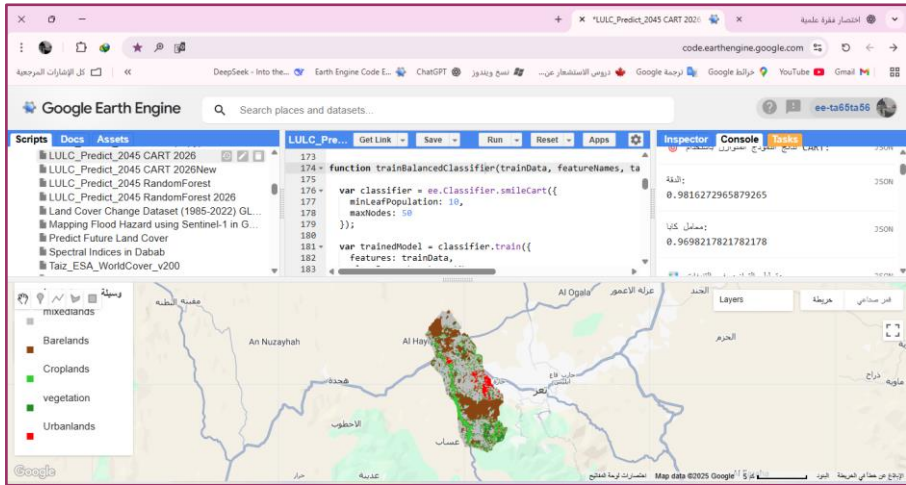
تم جمع جميع الصور والمتغيرات المستخدمة في التدريب ضمن مصفوفة واحدة تسمى variables، التي تمثل مدخلات النموذج لاستخراج الأنماط المكانية، بعد ذلك، تم تقسيم البيانات إلى مجموعتين: مجموعة تدريب (train) ومجموعة اختبار (test)، اعتماداً على عمود عشوائي يحدد النسبة المئوية للعينات لكل مجموعة.

تم تدريب نموذج شجرة التصنيف والانحدار (CART /smileCart) باستخدام مجموعة التدريب، ثم تقييم أدائه على مجموعة الاختبار من خلال مصفوفة الخطأ (confusion matrix) لحساب الدقة الكلية ومعامل كبا، وقد أظهرت النتائج دقة كلية (Overall Accuracy) بلغت (98%) ومعامل كبا (97%) (Kappa Coefficient)، (الشكل 4) مما يشير إلى توافق عالٍ وموثوقية قوية في التنبؤ بالغطاء الأرضي (Eastman, 2016). يلاحظ الارتفاع الملحوظ في دقة نموذج التنبؤ المستقبلي إلى كفاءة دمج نتائج التصنيف المستخرجة بواسطة خوارزمية CART مع نمذجة سلاسل ماركوف، حيث أسهم هذا التكامل في تمثيل اتجاهات التغير المكاني للغطاء الأرضي بصورة أكثر واقعية وموثوقية. كما ساعدت المتغيرات المكانية والطبوغرافية المستخدمة

في النمذجة على تحسين قدرة النموذج في محاكاة أنماط التغير المستقبلية وتقليل مستوى عدم اليقين في التنبؤات الناتجة.

بعد تقييم النموذج، تم إنشاء متغير جديد يمثل سنة التنبؤ (Variables_2045)، واستخدام النموذج المدرب لتصنيف الغطاء الأرضي للعام 2045. بعد التصنيف، تم حساب مساحة كل فئة من الغطاء الأرضي باستخدام دالة (ee.Image.pixelArea)، ثم تحويل النتائج إلى طبقات جغرافية (Feature Collections) مع تصنيف وتسمية الفئات النهائية، مما أتاح تمثيل التغير المكاني بطريقة كمية قابلة للتحليل والتطبيق التخطيطي.

الشكل رقم (4) التنبؤ المستقبلي للغطاء الأرضي في منطقة الدراسة للعام 2045م

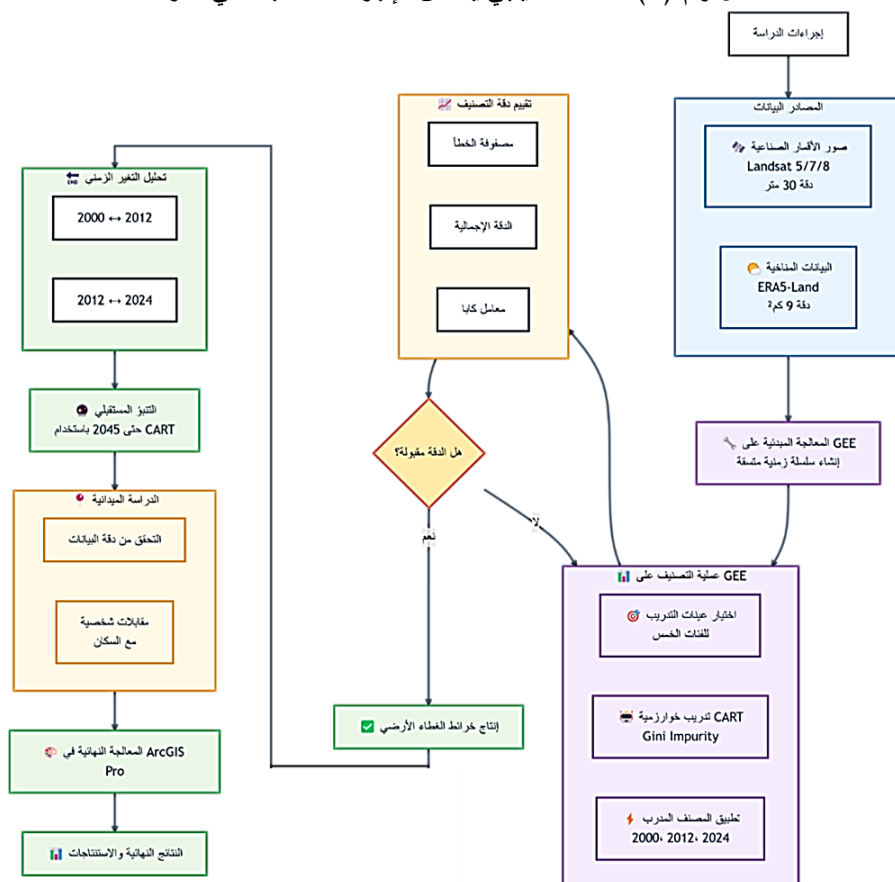


الأدوات والبرمجيات المستخدمة (Tools and Software Used)

- منصة (Google Earth Engine (GEE): كانت البيئة الرئيسية لمعالجة الصور الفضائية، وتنفيذ خوارزميات التصنيف (CART)، وتحليل التغير، والنمذجة التنبؤية.

- برنامج ArcGIS Pro: بعد استخراج النتائج النهائية من GEE، استخدم برنامج ArcGIS Pro لتحسين التصور الجغرافي، وتصميم وإخراج الخرائط والجدول بشكلها النهائي.

الشكل رقم (5) مخطط انسيابي يلخص الإجراءات المتبعة في الدراسة



مناقشة الدراسة (Discussion):

أولاً: الخصائص الطبيعية لمنطقة الدراسة:

تتداخل الخصائص الطبيعية مع بعضها لتكوّن أصناف الغطاءات الأرضية في منطقة الدراسة، وتحدد كيفية توزيعها واختلاف مساحاتها، ويكون لإحدى هذه الخصائص تأثيراً أكبر من غيرها في تأثيرها على تغير الغطاء الأرضي مع مرور الزمن، وفيما يلي عرضاً لهذه الخصائص:

1-1 الموقع الجغرافي: تعد منطقة الدراسة أحد روافد حوض وادي رسيان التي تتبع مجاريها من جبل صبر الواقع في وسط محافظة تعز ضمن المرتفعات الغربية للجمهورية اليمنية، وتقع بين خطي طول ($43^{\circ} 59' 30''$ و $43^{\circ} 54' 30''$)، ودائرتي

عرض ($13^{\circ} 39' 00''$ و $13^{\circ} 31' 00''$)، وساهم الموقع مع تفاعل بقية الخصائص الطبيعية كالمناخ والتكوين الجيولوجي، وتأثير عامل الارتفاع في جعلها منظومة بيئية متكاملة؛ حيث تتلقى كمية أمطار عالية تسببت في ارتفاع كمية مياه الجريان السطحي في الوادي وفي وجود التربة الخصبة التي أسهمت بدورها في تنوع النبات الطبيعي والزراعي، أما عامل الارتفاع فقد ساهم في جعل مناخ منطقة الدراسة معتدلاً طوال العام.

1-2 الخصائص الطبوغرافية: إن لتباين مظاهر سطح الأرض دور مهم في تنوع الغطاءات الأرضية، إضافة إلى تحكمها في تحديد أنماط استخدامات الأرض البشرية وأهمها الزراعة وال عمران اللتان تعملان على استقرار السكان.

يلاحظ من نموذج الارتفاعات الرقمية (DEM) أن منطقة الدراسة عبارة عن أراضي متباينة الارتفاع، فالجنوب الشرقي عبارة عن امتداد لجبل صبر ذي التضاريس الوعرة، ويصل ارتفاعه هنا إلى (2103 متر)، ثم يقل الارتفاع بالاتجاه نحو الغرب والشمال، حيث يتراوح بين (1774 - 970 متر)، وتبعاً لتباين الارتفاع تتباين درجات الانحدار ما بين (24° - 53°) في المناطق الجبلية، ثم تقل حتى تصل إلى (10° فأقل) في وسط منطقة الدراسة، وتعاود ارتفاعها في الشمال لوجود المرتفعات الجبلية.

1-3 خصائص المناخ: يعد مناخ منطقة الدراسة معتدل طوال العام، إذ تتراوح درجات الحرارة في فصول السنة بين (22° - 28°)، أما معدل الأمطار الموسمية السنوية فهو (610,7) ملم، (Copernicus, 2024)، هاتان الخاصيتان لهما أثر بارز في استقرار السكان وممارسة النشاط الزراعي ونمو النبات الطبيعي، وفي مياه الجريان السطحي في المجرى الرئيسي للوادي، وكذلك في تغذية طبقات المياه الجوفية التي يستغلها المزارعون في فصول الجفاف لري المحاصيل الزراعية.

1-4 خصائص التربة: تُظهر الدراسات الجيومورفولوجية والجيولوجية (Al-Kadasy, 1988) أن تربة وادي الضباب تنتمي إلى تكوينات العصر الرباعي الحديث، وتتكون من رواسب أودية ومراوح طميية وركام سفوح غير متماسكة (حصى، رمل، طين) نتجت عن عمليات النقل والترسيب المائي، وتتميز بارتفاع نفاذيتها مما يعزز تغذية المياه الجوفية. وتنتشر على ضفاف الوادي ترب طينية مزيجية أكثر تماسكاً، بينما تتكون المرتفعات من صخور بركانية مثل البازلت والريولايت والديزابيت (درويش،

2022؛ Janardhana & Al-Qadhi, 2017) بما يعكس التنوع الجيولوجي للمنطقة. أما زراعياً، فتُعد من أكثر الترب خصوبة في محافظة تعز بفضل غناها بالمواد العضوية والمعادن الدقيقة وقدرتها على الاحتفاظ بالرطوبة، مما جعلها بيئة ملائمة لزراعة المحاصيل المختلفة وأشجار الفاكهة. كما تسهم الرواسب الطميية في تجديد خصوبة التربة سنوياً خلال الفيضانات الموسمية (Pietsch & Mabit, 2012). وبيئياً، تسهم هذه الترب في تنظيم الدورة المائية عبر تغذية الخزان الجوفي والحد من الانجراف والتعرية، إضافة إلى دعم الغطاء النباتي الطبيعي وتحقيق التوازن البيئي والحد من التصحر في وادي الضباب (Wilkinson, 2003; FAO, 2010).

ثانياً: الخصائص البشرية لمنطقة الدراسة:

تؤدي العوامل الطبيعية دوراً فعالاً في نمط التوزيع الجغرافي لمراكز الاستقرار الريفي، فالتباين في مظاهر سطح الأرض، وعناصر المناخ المختلفة يؤدي إلى ظهور قيم مكانية متباينة، ولا شك في أن مثل هذا التباين يرجع إلى اختلاف في المواقع التي تقوم عليها المستقرات الريفية، فيتولى الإنسان من خلالها اختيار أكثر الأماكن ملائمة لتكون مراكزاً للاستقرار (الهيبي، ومحمد، 1988).

السكان: بلغ عدد السكان (4364) نسمة (التعداد السكاني، 2004)، ووفقاً للإسقاطات السكانية لعام (2024م) بلغت أعدادهم حوالي (20,897) نسمة، يتوزعون على (135) قرية، حيث يتأثر توزيعهم واختيار مواقع المستقرات الريفية بعدد من العوامل مثل توافر المياه والتربة الخصبة والنبات الطبيعي ووجود البنى التحتية مما يمكنهم من ممارسة أنشطتهم الاقتصادية المختلفة، وبالتالي تتوسع هذه المستقرات على حساب مختلف أصناف الغطاء الأرضي في منطقة الدراسة.

ثالثاً: أصناف الأغذية الأرضية في منطقة الدراسة ومساحاتها للأعوام (2000، 2012، 2024م):

أظهر تحليل المرئيات الفضائية للأعوام (2000، 2012، و2024م) الممثلة في (اللوحة 1) وجود خمسة أصناف رئيسية للغطاء الأرضي تتباين في مساحاتها كما هي موضحة في (الشكل 5)، وهي الأراضي المختلطة، والأراضي الجرداء، والأراضي الزراعية، وأراضي النبات الطبيعي، والأراضي المبنية.

3-1 الأراضي المختلطة: وسميت بذلك كونها تشمل جميع الأصناف، وتكون متداخلة فيما بينها، ويصعب الفصل بين وحداتها، لذلك تتأثر بزيادة أو نقصان أحد هذه الأصناف، وهذا الصنف هو الأكبر مساحة بالنسبة لبقية الأصناف حيث بلغت مساحته في عام (2000م) (33,3 كم²)، وتناقصت إلى (32 و 33 كم²) في العامين الأخيرين على التوالي.

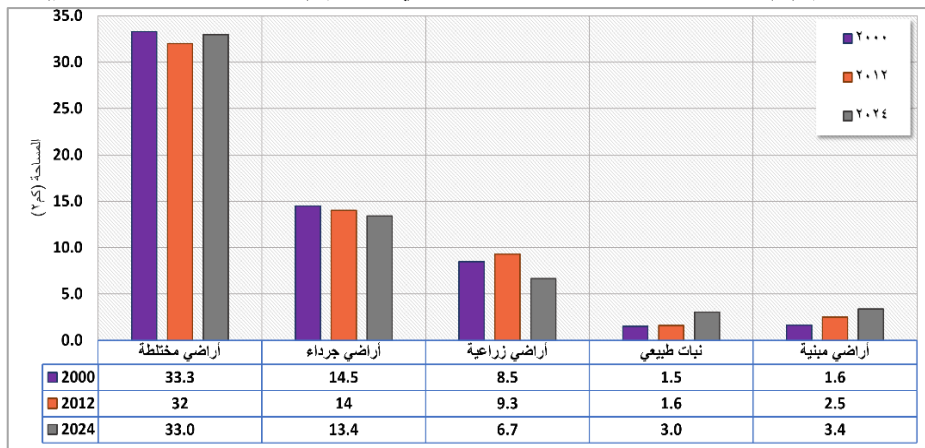
3-2 الأراضي الجرداء: تتمثل بالمرتفعات الجبلية، وبعض الأراضي الصخرية التي تشغل مساحة تقدر بـ (14,5 كم²) في عام (2000م)، ثم تناقصت لتصبح (14 و 13,4 كم²) في الأعوام التالية.

3-3 الأراضي الزراعية: تنتشر في عموم منطقة الدراسة لتوافر المياه السطحية والجوفية، ولخصوبة تربتها التي تتكون من الطمي والطين، وتتركز الزراعة حول مجرى وادي الضباب بسبب جريان المياه فيه طوال العام، ويمتد من جنوب شرق منطقة الدراسة إلى شمالها الغربي، كما تتنوع المحاصيل الزراعية بين الحبوب بأنواعها، والخضروات، والفواكه، وبعض المحاصيل النقدية، وبلغت مساحة هذا الصنف (8,5 كم²) عام (2000م)، ثم تزايدت إلى (9,3 كم²) في عام (2012م)، ثم تناقصت بشكل ملحوظ إلى (6,7 كم²) في العام الأخير (2024م).

3-4 النبات الطبيعي: ينتشر في معظم أراضي منطقة الدراسة، وتسود فيها الأشجار والشجيرات والحشائش دائمة الخضرة، وأهمها الطنب، العثرب، البلس، الأثل، الطلح، السدر، وتعتبر قيعان الأودية بيئات استثنائية للنباتات بسبب الفيضانات المتكررة في مواسم الأمطار، وارتفاع منسوب المياه في الرواسب طوال السنة، حيث تنمو الأشجار بكثافة حول حواف الحقول، وتتخلل هذه الأشجار الأراضي الزراعية التي تحمي المحاصيل من حرارة الجو المرتفعة، وأشعة الشمس المباشرة، ومن فيضانات السيول خلال مواسم الزراعة (أحمد الحبيشي، وكلاوس مولر هونشتاين، 1984). ويتركز وجود الأشجار الكثيفة في بعض سفوح الجنوب الشرقي، وفي أجزاء متفرقة من منطقة الدراسة، ويلاحظ عدم حدوث فارق كبير في قيم مساحاتها بين عامي (2000 و 2012م) حيث تراوحت بين (1,5 و 1,6 كم²)، بينما في عام (2024م) ازدادت بشكل ملحوظ إلى (3 كم²).

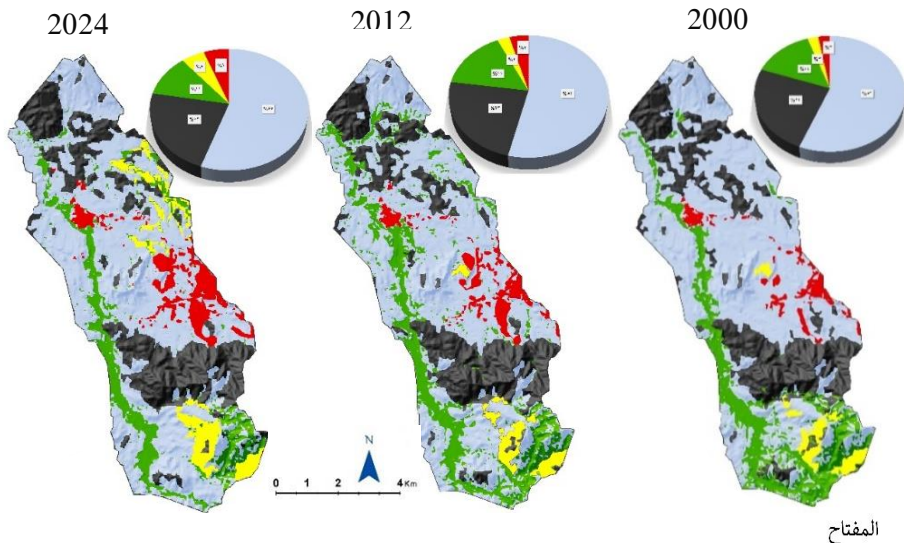
3-5 الأراضي المبنية: وتشمل المساكن والمصانع، والطرق، وبعض الخدمات العامة، والمحال التجارية، والأسواق، وازدادت مساحتها من (1,6 كم²) إلى (2,5 و 3,4 كم²) خلال السنوات الثلاث على التوالي. وسوف يتم التعرف على أسباب تباين مساحات الأصناف الخمسة في الفقرة القادمة لكشف التغير.

الشكل رقم (5) تباين مساحات أصناف الغطاء الأرضي للأعوام (2000، 2012، 2024م)



المصدر: الباحثة بالاعتماد على برنامج ArcGIS Pro.

اللوحة رقم (1) أصناف الغطاء الأرضي للأعوام (2000، 2012، 2024م)



المفتاح: حدود منطقة الدراسة □، نبات طبيعي ■، أراضي مختلطة ■، أراضي مبنية ■، أراضي زراعية ■، أراضي جرداء ■

المصدر: الباحثة بالاعتماد على بيانات Landsat باستخدام خوارزمية CART على منصة GEE وبرنامج ArcGIS Pro

رابعاً: النتائج (Results)

4-1 كشف تغيرات الغطاء الأرضي للأعوام ما بين (2000 - 2012م)، و(2012- 2024م): تغيرات الغطاء الأرضي ليست ثابتة ولا تسير بوتيرة متسقة أو متوقعة، فالصنف الموجود حالياً قد يتغير إلى صنف آخر وفق الظروف الطبيعية والبشرية المؤثرة في تلك البيئة. شهدت منطقة الدراسة تبايناً واضحاً في قيم أصناف الغطاء الأرضي، مما يعكس حجم التحولات البيئية والبشرية، وتشير قيم (الجدول 1) إلى إجمالي التغيرات في أصناف الغطاء الأرضي التي توضحها (اللوحة 2) وتباين مساحات كل صنف في المدة الأولى (2000 - 2012م)، والمدة الثانية (2012 - 2024م)، وهي كما يلي:

4-1-1 الأراضي المختلطة: أظهر هذا الصنف انخفاضاً طفيفاً في المساحة الإجمالية من (33,3 كم²) إلى (32 كم²)، أي بتراجع مقداره (1,3 كم²)، مع انخفاض في نسبة الاستقرار من (87,3%) إلى (87,8%) مقابل زيادة طفيفة في المساحات المتغيرة من (12,7%) إلى (12,2%)، مع استقرار نسبي في نسب الثبات والتغير، وهذا يشير إلى إعادة توزيع محدودة لاستخدامات الأرض فيه؛ ويُعزى ذلك إلى تحول أجزاء منه نحو الاستخدامين العمراني والزراعي، مدفوعاً بعودة المغتربين خلال تسعينات القرن الماضي والأحداث السياسية الراهنة التي شجعت التوسع السكني، بالإضافة إلى استصلاح بعض الأراضي لزراعة القات كمصدر دخل سريع ومريح. كما تأثرت بعض المساحات بظهور الغطاء النباتي الطبيعي نتيجة حظرها عسكرياً منذ عام 2015، إضافة إلى دور الأمطار الموسمية في تعزيز هذا الغطاء.

4-1-2 الأراضي الجرداء: شهدت انخفاضاً طفيفاً في المساحة من (14,5 كم²) إلى (14 كم²) (-0,5 كم²)، مع تراجع نسبة الاستقرار من (91,7%) إلى (88,7%) وارتفاع المساحات المتغيرة من (8,2%) إلى (11,3%)، وهو ما يعكس بداية تأثيرات التعرية أو التوسع البشري المحدود على هوامش هذه الأراضي.

4-1-3 الأراضي الزراعية: يمكن اختصار الفقرة على النحو الآتي: شهدت الأراضي الزراعية في منطقة الدراسة زيادة من (8.5 كم²) إلى (9.3 كم²) بزيادة قدرها (+0.8 كم²)، مع تراجع نسبة الاستقرار من (72.7%) إلى (60.5%) وارتفاع

المساحات المتغيرة من (27.5%) إلى (39.5%)، مما يعكس ديناميكية استخدام مرتفعة وتوسعاً زراعياً على حساب الأراضي المختلطة والجرداء، خاصة في شمال ووسط المنطقة لقربها من طرق مدينة تعز. ويرتبط هذا التوسع بانتشار زراعة القات وما تسببه من استنزاف للموارد المائية وتدهور للتربة، الأمر الذي يستدعي الحد من التوسع فيها وتشجيع المحاصيل الغذائية وتقنيات الري الكفؤة. وفي المقابل، شهدت بعض الأراضي الزراعية، خصوصاً في الجزء الجنوبي، تحولاً إلى أراضي مختلطة أو جرداء نتيجة التوسع العمراني وسوء إدارة المياه وتراجع النشاط الزراعي. كما أسهمت الهجرة الداخلية والأوضاع السياسية والاقتصادية منذ عام 2015 في تغيير أنماط استغلال الأراضي والتوسع في الزراعات ذات العائد المرتفع، وعلى رأسها القات، مما أدى إلى تدهور الخصائص الإنتاجية للأراضي وتغير استخداماتها (FAO, 2018).

الجدول رقم (1) إجمالي مساحات تغير أصناف الغطاء الأرضي للأعوام (2000 - 2012م) و(2012 - 2024م)

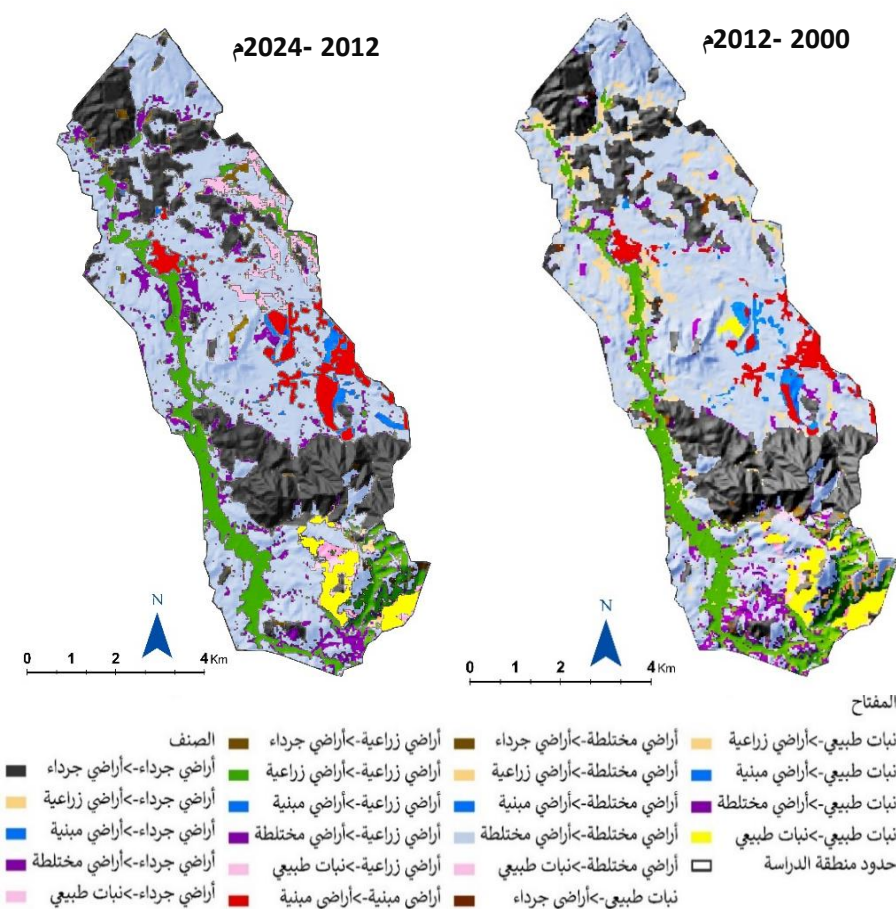
المدة	الحالة	المنطقة / المساحة (كم ²) / النسبة المئوية								
		المختلطة	(%)	الزراعية	(%)	الزراعية	(%)	الزراعية	(%)	المختلطة
2012 - 2000	لا يوجد تغير	29,1	87,3	13,3	91,7	6,2	72,7	1,3	89,1	1,6
	المساحات المتغيرة	4,2	12,7	1,2	8,2	2,3	27,5	0,2	10,7	0
	الإجمالي	33,3	100	14,5	100	8,5	100	1,5	100	1,6
2024 - 2012	الحالة	المنطقة / المساحة (كم ²) / النسبة المئوية								
		المختلطة	(%)	الزراعية	(%)	الزراعية	(%)	الزراعية	(%)	المختلطة
2024 - 2012	لا يوجد تغير	28	87,8	12,4	88,7	5,6	60,5	1,3	80	2,4
	المساحات المتغيرة	4	12,2	1,6	11,3	3,7	39,5	0,3	20	0
	الإجمالي	32	100	14	100	9,3	100	1,6	100	2,4

المصدر: الباحثة بالاعتماد على برنامج ArcGIS Pro.

4-1-4 النبات الطبيعي: شهد هذا الصنف تغيراً محدوداً في المساحة من (1,5 كم²) إلى (1,6 كم²) بزيادة (0,1 كم²)، غير أن نسبة الاستقرار انخفضت من (89,1%)

إلى (80%) مع ارتفاع المساحات المتغيرة من (7,10%) إلى (20%)، مما يعكس تدهورًا نسبيًا في استقرار هذا الصنف؛ نتيجة الرعي الجائر أو التوسع الزراعي، ويلاحظ ظهوره مختلطًا بالأصناف الأخرى، ويزداد ظهوره في موسم الأمطار، ولعل ذلك ما يفسر الزيادة الطفيفة في القيمة المذكورة، وفي المقابل يلاحظ ازدياد هذا الصنف خاصة في شرق ووسط منطقة الدراسة (منطقة المطار القديم)؛ كون هذه الأماكن محظورة عسكريًا منذ العام (2015م) كونها مناطق تماس نشطة، مما جعل الوصول إليها غير ممكن خلال فترات طويلة.

اللوحة رقم (2) كشف تغيرات الغطاء الأرضي للأعوام (2000-2012م) و(2012-2024م)



المصدر: الباحثة بالاعتماد على الخرائط المصنفة للغطاء الأرضي باستخدام النموذج الاحتمالي لمصفوفة الانتقال (Markov Chains) على منصة GEE وبرنامج ArcGIS Pro.

4-1-5 الأراضي المبنية: شهدت الأراضي المبنية زيادة من (1.6 كم²) إلى (2.4 كم²) بزيادة قدرها (0.8 كم²)، وهو ما يعكس التوسع الحضري المرتبط بالنمو السكاني، وتطور البنية التحتية، وقرب المنطقة من مدينة تعز، ووجود بعض الأنشطة الصناعية. وقد تركز هذا التوسع بشكل متزايد في الجزء الغربي من منطقة الدراسة على حساب الأراضي الزراعية الواقعة على ضفاف وادي الضباب، مما قد يزيد من مخاطر الفيضانات وتدهور التربة الزراعية وانخفاض الإنتاجية والآثار البيئية المصاحبة. كما أظهرت نتائج تحليل التغيرات خلال الفترتين (2000-2012م) و(2012-2024م) استحداث مكبٍ للنفايات في منطقة حدائق الصالح (حدائق الشهاب)، وهو من أبرز التغيرات السلبية الحديثة، إذ أدى ذلك إلى تحويل أجزاء من الغطاء النباتي والأراضي الزراعية والترفيهية إلى مواقع لتجميع النفايات وحرقها، مما أثر سلباً في الهواء والتربة والغطاء النباتي المحيط. وتشير النتائج إلى ارتباط ظهور المكب بتراجع بعض مساحات الغطاء النباتي خلال الفترة (2012-2024م) نتيجة التوسع في الاستخدامات غير الزراعية وما يرافقها من ضغوط بيئية تؤثر في استدامة الموارد الأرضية والتوازن البيئي.

4-2 التنبؤ المستقبلي للتغيرات المكانية للغطاء الأرضي حتى العام (2045م):

يسهم التنبؤ بالغطاء الأرضي في فهم التغيرات المستقبلية له، وتطوير السياسات الصحيحة لدعم اتجاهات تغير الأراضي، ويتضح من (الجدول 2) و(الشكل 6) أن أصناف الغطاء الأرضي في عام (2045م) مقارنة بعام (2024م) سوف تتباين عن بعضها في الأعوام الواحد والعشرين القادمة.

الجدول رقم (2) يوضح التنبؤ المستقبلي بالغطاء الأرضي (كم²) لعام (2045م)

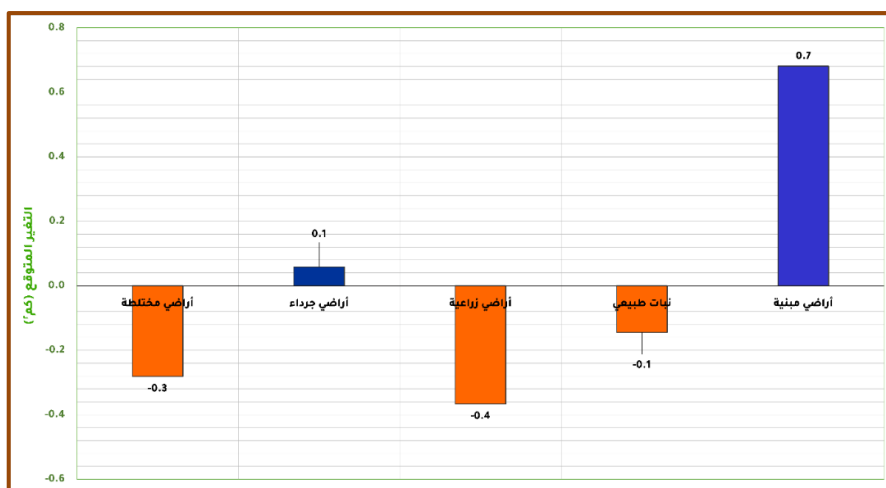
المنطقة	المساحة عام 2012	المساحة عام 2024	المساحة عام 2045	التغير المتوقع
أراضي مختلطة	32	33	32,7	-0,3
أراضي جرداء	14	13,4	13,5	0,1
أراضي زراعية	9,3	6,7	6,3	-0,4
نبات طبيعي	1,6	3	2,9	-0,1
أراضي مبنية	2,5	3,4	4,1	0,7
الإجمالي	59,4	59,4	59,4	

المصدر: الباحثة بالاعتماد على البيانات المشتقة من خرائط التنبؤ بواسطة ArcGIS Pro.

على الرغم من الكفاءة العالية التي حققها النموذج المستخدم، فإن نتائج التنبؤ المستقبلي تظل مرتبطة بافتراض استمرار الاتجاهات الحالية للتغيرات المكانية والبيئية دون حدوث متغيرات جوهرية في السياسات التنموية أو الظروف الطبيعية أو الأنشطة البشرية، وهو ما قد يؤثر في دقة السيناريوهات المستقبلية المتوقعة. بعد إجراء عملية التنبؤ، والحصول على (الخريطة 2) للتوقعات المستقبلية بالغطاءات الأرضية لعام (2045م) يتبين أن مساحات الأصناف جميعاً سيحدث لها تغيرات سلبية أكثر من غيرها، والبعض الآخر سيحدث لها توسع على حساب أصناف أخرى، وهي كالتالي:

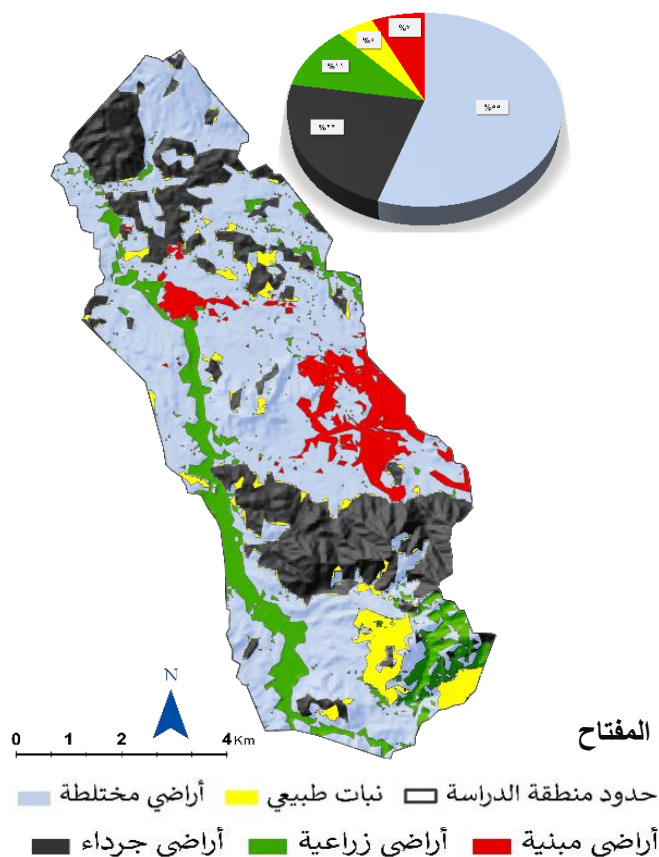
4-2-1 الأراضي المختلطة: تشير نتائج التنبؤ إلى انخفاض طفيف في مساحتها من (33 كم²) إلى (32,7 كم²)، أي بمقدار (-0.3 كم²)، ويُعزى هذا التراجع إلى تزايد الضغوط البشرية المرتبطة بالتوسع العمراني وتحسن البنية التحتية، كما قد تسهم عوامل أخرى، مثل تدهور الأراضي الزراعية، والغطاء النباتي، والتغيرات المناخية، والهجرة، في تعزيز هذا الاتجاه، مما يؤكد الطابع الديناميكي للمناطق الانتقالية بين الريف والحضر في منطقة الدراسة.

الشكل رقم (6) التغير المتوقع لمساحات أصناف الغطاء الأرضي في منطقة الدراسة للعام (2045م)



المصدر: الباحثة بالاعتماد على الجدول رقم (2).

الخريطة رقم (2) التنبؤ بحالة الغطاء الأرضي في منطقة الدراسة لعام (2045م)



المصدر: الباحثة، بالاعتماد على نتائج مصفوفة التغير الاحتمالية للغطاء الأرضي (Markov) وتحليلها بنموذج (CART) على منصة (GEE)، وبرنامج ArcGIS Pro.

4-2-2 الأراضي الجرداء: تشير نتائج التنبؤ إلى زيادة طفيفة في مساحتها من (13,4 كم²) إلى (13,5 كم²)، أي بمقدار (0,1 كم²)، وهو ما يعكس استمرار عمليات التدهور في بعض الأراضي الزراعية ومناطق الغطاء النباتي الطبيعي نتيجة الإهمال والضغوط البيئية. ومن ناحية أخرى، تبقى مساحات الأراضي الجرداء الأصلية المتمثلة في المرتفعات ذات الصخور النارية والانحدارات المتوسطة إلى الشديدة محدودة القابلية للتحويل إلى استخدامات أخرى، نظرًا لافتقارها إلى تربة صالحة وصعوبة استصلاحها.

4-2-3 الأراضي الزراعية: يلاحظ من قيم مساحاتها أنها أكثر الفئات تراجعاً من (6,7 كم²) إلى (6,3 كم²) بمقدار تغير (-0,4 كم²)، ويرتبط هذا الانخفاض بعمليات التوسع العمراني غير المنظم، والهجرة، واستنزاف الموارد المائية السطحية والجوفية، وتدهور التربة بسبب زراعة القات، إلى جانب تكرار فترات الجفاف التي تؤدي إلى تقليص المساحات المزروعة، مما يسهم في تقلص المساحات المزروعة وانخفاض الإنتاجية الزراعية.

4-2-4 الغطاء النباتي: يتأثر تواجد وانتشاره بمواسم هطول الأمطار، ويتداخل مع بقية الأصناف الموجودة في منطقة الدراسة، وتشير التوقعات إلى انخفاضه من (3 كم²) إلى (2,9 كم²) بمقدار تغير (-0,1 كم²)، نتيجة التأثير بالتغيرات المناخية، خاصة تقلبات درجات الحرارة والأمطار، ومواسم الجفاف، إلى جانب استمرار التحطيب والتوسع العمراني، مما يؤدي إلى زيادة تدهوره في بعض المواقع قليلة الانحدار أو بالقرب من الأراضي الزراعية.

4-2-5 الأراضي المبنية: وتشهد أعلى معدلات الزيادة حيث يتوقع أن تبلغ مساحتها حوالي (4,1 كم²)، بعد أن كانت تشغل مساحة (3,4 كم²) بفارق (0,7 كم²) على حساب الأصناف الأخرى لا سيما الأراضي الزراعية والمختلطة؛ نتيجة تحسن البنى التحتية، وغيرها.

- استناداً إلى نتائج المناقشة السابقة، يتبين أن التغير في أصناف الغطاء الأرضي يرجع إلى مجموعة من الضغوط البيئية والبشرية، التي تنعكس بدورها على استدامة الغطاء الأرضي، وتؤكد هذه النتائج أهمية دمج مخرجات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية في عمليات التخطيط المكاني وإدارة الموارد الطبيعية؛ لما توفره من معلومات دقيقة تساعد في توجيه التنمية المستدامة والحد من الآثار السلبية للتغيرات المتسارعة في أنماط استخدامات الأرض والغطاء الأرضي، ويمكن استخلاص هذه التغيرات فيما يلي:

1. **تدهور الأراضي الزراعية:** يؤدي التوسع العمراني غير المنظم إلى تقليص المساحات الزراعية، وتجزئة الحيازات الزراعية، فضلاً عن التحول إلى زراعة

- القات، الأمر الذي ينعكس سلبيًا على الأمن الغذائي المحلي.
2. **استنزاف الموارد المائية السطحية والجوفية:** يرتبط بالتوسع الزراعي والنمو العمراني المتسارع، في ظل ضعف إدارة الموارد المائية، مما يشكل أحد أهم العوامل المؤثرة في تغير أنماط الغطاء الأرضي وتدهوره.
3. **زيادة معدلات التعرية والجفاف:** يساهم تراجع الغطاء النباتي الطبيعي إلى اختلال التوازن البيئي وضعف التماسك السطحي للتربة، وزيادة تعرضها لعوامل الانجراف المائي، وتدهور المراعي الطبيعية، وتراجع قدرة التربة على الاحتفاظ بالمياه، وارتفاع درجات الحرارة السطحية، وزيادة معدلات التبخر-نتح، وتسارع عمليات التصحر؛ مما ينجم عنه زيادة قابلية النظم البيئية للاضطرابات المناخية، وزيادة المساحات الجرداء.
4. **تأثيرات اجتماعية واقتصادية:** تفرز هذه التحولات آثارًا اجتماعية مباشرة تتمثل في تراجع العوائد الاقتصادية للمزارعين، وتراجع الأمن الغذائي المحلي؛ مما يؤدي إلى هجرة بعض السكان نحو المدينة أو خارجها بحثًا عن مصادر دخل بديلة، وبالتالي زيادة الضغط على الخدمات الحضرية، وتحول أنماط المعيشة نحو أنشطة غير زراعية.

التوصيات (Recommendations):

- يؤدي الاختلال في النظم البيئية إلى تدهورها، وإرباك علاقتها الاقتصادية بمدينة تعز. وتوفر النتائج التي تم الوصول إليها في هذه الدراسة معلوماتٍ لمساعدة صناع القرار على اتخاذ ممارسات فعالة للتخطيط المستقبلي للغطاء الأرضي، منها:
1. **التوعية المجتمعية:** رفع الوعي لدى السكان بأهمية الحفاظ على البيئة والموارد الطبيعية، وتشجيع المشاركة المجتمعية في جهود الحماية والإدارة المستدامة.
 2. **تطبيق القوانين والتشريعات:** المتعلقة بحماية البيئة، والموارد الطبيعية، ومحاسبة المخالفين.
 3. **دعم المزارعين:** تنويع المحاصيل الزراعية وتقليل الاعتماد على زراعة القات مع التوعية بأضراره البيئية والصحية، والحفاظ على الأراضي الزراعية لضمان الإمداد

- الغذائي للأسواق المحلية، إضافة إلى استصلاح الأراضي الصالحة للزراعة، وحماية الغطاء النباتي الطبيعي، وتشجيع برامج إعادة التشجير .
4. **دعم الخطط التنموية:** كتنمية المشاريع السياحية وإقامة المتنزهات بغرض تشجيع السكان على المحافظة على البيئة الطبيعية.
5. **التخطيط العمراني المستدام:** وضع خطط عمرانية تهدف إلى حماية الأراضي الزراعية، والمساحات الخضراء من الزحف العمراني العشوائي، وتوجيه النمو السكاني نحو المناطق الجرداء.
6. **دعم البحث العلمي وتطبيق التقنيات الحديثة:** إنشاء نظام دوري لرصد وتحديث تغيرات الغطاء الأرضي باستخدام صور الأقمار الصناعية ومنصة **Google Earth Engine**، بما يدعم الكشف المبكر عن التغيرات البيئية والعمرانية، ويسهم في بناء قاعدة بيانات وطنية للغطاء الأرضي. ويعزز ذلك توظيف تقنيات الاستشعار عن بعد، ونظم المعلومات الجغرافية، والتعلم الآلي والذكاء الاصطناعي، بما يرفع دقة التحليل ويقلل التكلفة والوقت، ويدعم التخطيط والتنمية المستدامة.
7. **تشجيع توظيف نماذج التعلم الآلي والتنبؤ المكاني** في الدراسات الجغرافية المستقبلية، وإجراء مقارنات بين الخوارزميات المختلفة مثل RF و SVM بهدف تحسين دقة النماذج التنبؤية ودعم التخطيط المستقبلي للموارد الأرضية.
8. **تعزيز إعداد الكوادر الجغرافية:** عبر توظيف الذكاء الاصطناعي في سوق العمل المعاصر بتهيئة متخصصين يجمعون بين المعرفة الجغرافية والمهارات التقنية، وإتقان تقنيات الجيل الرابع للجغرافيا (**GEE & Big Data**) بما يلبي احتياجات سوق العمل في المجالات الجغرافية المختلفة.

إطار عمل الرقابة المكانية الدورية للغطاء الأرضي والموارد الطبيعية
(باستخدام Google Earth Engine وتقنيات التعلم الآلي)

المرحلة	الهدف	الأدوات/المدخلات	دورية التنفيذ	المخرجات	الجهة المسؤولة
1. جمع البيانات والتحديث الدوري	تحديث خرائط الغطاء الأرضي ورصد التغيرات البيئية	صور Landsat و Sentinel بيانات مناخية وطبوغرافية	شهري: نفايات وتلوث كل 3 أشهر: توسع عمراني وتعديلات نباتي وأراض زراعية سنوي: تقرير شامل	خرائط محدثة للغطاء الأرضي وتقارير دورية	وحدة GIS بالمحافظة + التخطيط والتعاون الدولي
2. التحليل الآلي للتغيرات	كشف التغيرات البيئية والعمرانية آلياً	خوارزميات Random Forest و CART مؤشرات NDVI/NDBI/LST	تحليل دوري مرتبط بتحديث البيانات	خرائط تغير + تحديد مناطق التدهور أو التوسع	GIS + جامعة تعز
3. مؤشرات الإنذار المبكر	بناء نظام إنذار مبكر ومكاني	مؤشرات: فقدان أراضي زراعية، غطاء نباتي، توسع عمراني، تعديلات، مكبات	تحديث مستمر + تقييم دوري	مستويات إنذار (أصفر/أحمر) + إجراءات فورية	
المؤشر	الإنذار الأصفر	الإنذار الأحمر	الإجراء الإداري المباشر		
فقدان الأراضي الزراعية	> 5%	> 15%	إيقاف تراخيص البناء في المنطقة المتأثرة		
تراجع الغطاء النباتي	> 10%	> 20%	تنفيذ برنامج تشجير عاجل واستعادة الغطاء النباتي		
التعديلات على الأراضي الزراعية	حالة واحدة	تكرار التعديلات أو تعددها	إزالة التعدي خلال 72 ساعة بقرار إداري		
مكبات النفايات	مكب غير مرخص	امتداد المكب لأكثر من 500 م ²	غرامة فورية وإزالة المكب المخالف		
المرحلة	الهدف	المخرجات	الاستخدام	الجهة المسؤولة	
4. لوحات المتابعة (Dashboard)	عرض البيانات للمسؤولين بشكل لحظي	خرائط تفاعلية + إشعارات إنذار	دعم القرار الفوري	غرفة العمليات + GIS	
5. اتخاذ القرار والتقييم	تحويل البيانات إلى سياسات وإجراءات	قرارات تخطيط + حماية بيئية + تقييم سنوي	إدارة الموارد والتنمية المستدامة	المجلس المحلي + الزراعة + البيئة	

قائمة المصادر والمراجع:

– المراجع العربية:

- الحببشي، أحمد ، وهونشتاين، كلاوس مولر (1984) .، مقدمة الغطاء النباتي في اليمن، المؤسسة الألمانية للتعاون الفني (GTZ).
- الدليمي، خلف حسين علي، (2007) ، الاتجاهات الحديثة في البحث العلمي الجغرافي (ط، 1)، دار الصفاء للنشر والتوزيع.
- الصالح، ناصر عبد الله، والسرياني، محمد محمود، (2000) ، الجغرافية الكمية والإحصائية: أسس وتطبيقات بالأساليب الحاسوبية الحديثة، مكتبة العبيكان للنشر.
- العثمان، باسم عبد العزيز عمر، (2009) ، مناهج البحث الجغرافية وتطبيقاتها في الجغرافية البشرية (ط، 1)، دار السياب للطباعة والنشر والتوزيع.
- الهيتي، صبري فارس، ومحمد، خليل إسماعيل، (1988) ، جغرافية الاستيطان الريفي، وزارة التعليم العالي والبحث العلمي، جامعة بغداد، مطبعة التعليم العالي في الموصل.
- درويش، إبراهيم عبد الله قائد عبد الله، (2022)، تحديد أنسب المواقع لحصاد مياه السيول في حوض وادي الضباب جنوب غرب مدينة تعز باستخدام نظم المعلومات الجغرافية متعددة المعايير، مجلة ليبيا للدراسات الجغرافية، (2).
- عقلان، تهاني عباس أحمد، (2023)، تغيرات الغطاء الأرضي في حوض وادي بنا وانعكاساتها البيئية باستخدام الجيوماتكس، قسم الجغرافيا، كلية الآداب، جامعة عدن.
- وزارة التخطيط والتعاون الدولي التعداد السكاني، (2004م)، الجمهورية اليمنية، صنعاء: الجهاز المركزي للإحصاء.
- وكالة الفضاء الأوروبي Copernicus، (2024م)، <https://code.earthengine.google.com/>، بواسطة منصة GEE.

المراجع الأجنبية:

- Al-Kadasy, M. A. B. O. (1988). *Geology of Gabal Saber granitic mass, Taiz area, Yemen Arab Republic* (Unpublished master's thesis). Department of Geology, Faculty of Science, University of Sana'a.
- Ayush, S., & Gaurav, S. (2023). *Decision trees: Classification and regression trees (CART)*. National Institute of Science Education and Research (NISER), Bhubaneswar.
- Breiman, L., Friedman, J., Olshen, R., & Stone, C. (1984). *Classification and regression trees*. Chapman & Hall/CRC.
- Eastman, J. R. (2016). *TerrSet geospatial monitoring and modeling system: Manual*. Clark University.
- Esri. (2024). How decision tree classification and regression works. [ArcGIS Pro Documentation](#)
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2010). *A framework for a national soil series system in Yemen*. FAO.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2018). *The state of food and agriculture 2018: Migration, agriculture and rural development*. FAO.
- GEE (Google Earth Engine). (2024). Introduction to Google Earth Engine. [Google Earth Engine](#)
- geeksforgeeks. (2024). CART classification and regression tree in machine learning. [GeeksforGeeks CART Article](#)
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*.
- James, G., Witten, D., Hastie, T., Tibshirani, R., & Taylor, J. (2021). *An introduction to statistical learning: With applications in R* (2nd ed.). Springer.
- Janardhana, M. R., & Al-Qadhi, A. A. (2017). Geotechnical characteristics of volcanic soils in and around Taiz City, Yemen. *ResearchGate*.

- Maher, M. A., Yuek, M. H., Mohammad, F. R., & Zulfa, H. A. (2017). Improving the capability of an integrated CA-Markov model to simulate spatio-temporal urban growth trends using an analytical hierarchy process and frequency ratio. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*.
- Martin, K., & Naomi, A. (2017). Classification and regression trees (CART). *Nature America, Inc., part of Springer Nature*.
- Parker, D. C. (2002). Agent-based models of land-use and land-cover change. LUCC, Indiana University, USA.
- Pietsch, D., & Mabit, L. (2012). Terrace soils in the Yemen highlands: Using physical and chemical properties to characterize a soil map unit. *Geoderma*, 189–190, 616–626.
- Singh, A. (1989). Digital change detection techniques using remotely-sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, 10(6), 989–1003.
- Wilkinson, T. J. (2003). Soil erosion and valley fills in the Yemen highlands and coastal lowlands. *Geoarchaeology*, 18(3), 297–320.
- Xie, S., Liu, L., Zhang, X., Yang, J., Chen, X., & Gao, Y. (2019). Automatic land-cover mapping using Landsat time-series data based on Google Earth Engine. *Remote Sensing*.
- Xiong, J., Thenkabail, P. S., Gumma, M. K., Teluguntla, P., Poehnelt, J., Congalton, R. G., Yadav, K., & Thau, D. (2017). Automated cropland mapping of continental Africa using Google Earth Engine cloud computing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 126, 225–244.