

تحليل ورسم خرائط تغيرات الغطاء الأرضي في مدينتي
الرياض وتونس ١٩٨٤ إلى ٢٠٢٤ باستخدام
الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية

**Analysis and Mapping of Land Cover Changes in
Riyadh and Tunis(1984 to 2024) Using Remote
Sensing and Geographic Information Systems**

**إعداد
د. خديجة يحيى فقيه**

أستاذ الخرائط المشارك
قسم الجغرافيا والاستدامة البيئية _ كلية العلوم الإنسانية والاجتماعية _ جامعة
الأميرة نورة بنت عبد الرحمن
الرياض- المملكة العربية السعودية
Email : kafaqeeh@pnu.edu.sa

بإصدار شهر يوليو لسنة ٢٠٢٥ م
شعبة البحوث الجغرافية

ملخص

يهدف البحث إلى دراسة وتحليل التغيرات في الغطاء الأرضي بمدينتي الرياض ومدينة تونس الكبرى خلال الفترة الممتدة من ١٩٨٤ إلى ٢٠٢٤، باستخدام تقنيات الاستشعار عن بعد وخوارزميات التصنيف الآلي.

أظهرت نتائج تصنيف الغطاء الأرضي لمدينة تونس الكبرى باستخدام خوارزمية الغابة العشوائية (Random Forest) دقة كلية تراوحت بين ٨٣,٠٤% و ٨٩,٢٩%، بينما تراوح معامل كابتا بين ٠,٧٧ و ٠,٨٩، مما يعكس موثوقية جيدة إلى عالية في نتائج التصنيف. سجلت الأراضي الفضاء ارتفاعاً ملحوظاً من ٢٠,١% سنة ١٩٨٤ إلى ٤٣% سنة ٢٠١٤ نتيجة تسارع الأنشطة العمرانية والاقتصادية، ثم تراجعت نسبياً إلى ٣٨,٧% في عام ٢٠٢٤. كما شهدت المساحات الغابية تراجعاً واضحاً من ٩,٣% إلى ٦,٧%، بينما ارتفعت المناطق العمرانية بشكل متواصل من ٦,٥% إلى ١٦,٦% خلال نفس الفترة. أما الأراضي الزراعية والمساحات الخضراء فقد تراجعت من ٦٢,٢% سنة ١٩٨٤ إلى ٣٣,٨% سنة ٢٠١٤، مع تسجيل ارتفاع نسبي إلى ٣٦,٥% سنة ٢٠٢٤.

في مدينة الرياض، أظهر تصنيف الغطاء الأرضي باستخدام الخوارزمية RF أداءً جيداً على مدى العقود المدروسة، حيث تراوحت الدقة الكلية بين ٨٨,١٤% و ٩٣,١٦%، بينما تراوح معامل كابتا بين ٠,٧٦ و ٠,٨٧، مما يعكس مستوى عالٍ من الدقة والاتساق في التصنيف. كشفت التحليلات المكانية عن تراجع نسبة الأراضي الفضاء من ٨٥,٢% عام ١٩٨٤ إلى ٦٨,٤% عام ٢٠٢٤، في دلالة واضحة على تسارع النمو العمراني وتوسع الرقعة الحضرية. كما ارتفعت نسبة المناطق العمرانية من ١٣,٨% إلى ٢٩,١% خلال نفس الفترة، وهو ما يشير إلى تضاعف الكتلة البنائية نتيجة التوسع الحضري المستمر. في المقابل، شهدت الأراضي الخضراء تحسناً طفيفاً من ٠,٩٩% إلى ١,٥%، بينما ظلت المسطحات المائية محدودة الانتشار، حيث ارتفعت نسبتها من ٠,٠٤% إلى ٠,٠٨% فقط، مما يؤكد ندرة الموارد المائية السطحية في المنطقة.

تعكس هذه النتائج تزايد الضغوط الحضرية على الموارد الطبيعية في كلتا المدينتين، مما يبرز أهمية تبني استراتيجيات أكثر استدامة في التخطيط العمراني وإدارة الموارد البيئية للحد من آثار التحضر السريع وضمان الحفاظ على التوازن البيئي.

الكلمات المفتاحية: تغير الغطاء الأرضي، الاستشعار عن بعد، التصنيف الآلي، التوسع العمراني، تونس الكبرى، الرياض، التخطيط الحضري المستدام، الغابة العشوائية.

Abstract

This research aims to study and analyze land cover changes in Riyadh and Greater Tunis from 1984 to 2024 using remote sensing techniques and automated classification algorithms.

The land cover classification results for Greater Tunis using the Random Forest (RF) algorithm showed overall accuracies ranging from 83.04% to 89.29%, with Kappa coefficients between 0.77 and 0.89, indicating good to high reliability of the classification outcomes. Bare lands significantly increased from 20.1% in 1984 to 43% in 2014 due to the acceleration of urban and economic activities, then slightly declined to 38.7% in 2024. Forested areas experienced a clear decline from 9.3% to 6.7%, while urban areas continuously expanded from 6.5% to 16.6% during the same period. Agricultural and green areas decreased from 62.2% in 1984 to 33.8% in 2014, with a slight recovery to 36.5% by 2024.

In Riyadh, land cover classification using the RF algorithm showed strong performance throughout the studied decades, with overall accuracies ranging from 88.14% to 93.16%, and Kappa coefficients between 0.76 and 0.87, reflecting a high level of classification accuracy and consistency. Spatial analysis revealed a decrease in bare land from 85.2% in 1984 to 68.4% in 2024, clearly indicating rapid urban growth and expansion of the urban footprint. Urban areas increased from 13.8% to 29.1% during the same period, signaling a doubling of the built-up area due to ongoing urban expansion. Meanwhile, green areas showed a slight improvement from 0.99% to 1.5%, while water bodies remained limited, increasing only from 0.04% to 0.08%, highlighting the scarcity of surface water resources in the region.

These findings reflect increasing urban pressures on natural resources in both cities, underscoring the need for more sustainable strategies in urban planning and environmental resource management to mitigate the effects of rapid urbanization and maintain ecological balance.

Keywords: Land cover change, Remote sensing, Machine learning classification, Urban expansion, Greater Tunis, Riyadh, Sustainable urban planning, Random Forest.

١ - مقدمة

شهدت المدن الكبرى في المملكة العربية السعودية وفي الجمهورية التونسية نمواً عمرانياً ملحوظاً خلال العقود الماضية، نتج عنه توسع عمراني متسارع على حساب الأراضي الزراعية وغير الزراعية واسع للأراضي الطبيعية والزراعية، خاصة في المدن الكبرى مثل الرياض والعاصمة تونس (تعرف باسم تونس الكبرى) واللذان تُعدان مركزين إداريين واقتصاديين حيويين (Al-Dulaimi et al., 2019; Bakari & El WERIEMMI, 2024).

يُعدّ رصد التغيرات في استخدامات الأراضي وتحليل الغطاء الأرضي من الركائز الأساسية لفهم أنماط التوسع الحضري وآثاره البيئية والاجتماعية، كما أنه يمثل أداة داعمة في عمليات التخطيط العمراني المستدام.

تعدّ المرئيات الفضائية مدخلات أساسية في مجال إنتاج خرائط استخدامات الأراضي والغطاء الأرضي Land Use/Land Cover (LU/LC) maps (Taha, 2016). فيما يخص خرائط استخدام الأراضي فهي توثق الأنشطة البشرية من بناء وزراعة، في حين تظهر خرائط الغطاء الأرضي الأصناف الفعلية للأرض من غابات ومياه ومناطق مبنية (Yang, et al., 2017) ولهذه الخرائط تطبيقات كثيرة مثل التخطيط الحضري وإدارة الموارد ومراقبة البيئة.

تقليدياً، تم الاعتماد في تحليل التغيرات المكانية على برامج مكتبية متخصصة مثل ERDAS Imagine وENVI وبرامج نظم المعلومات الجغرافية مثل ArcGIS، والتي تُمكن من إجراء تصنيف الصور وتحليل السلاسل الزمنية باستخدام طرق مثل تصنيف ما بعد المعالجة Post Classification Comparison والتحليل الطيفي Spectral Change Analysis. وعلى الرغم فاعلية هذه الأدوات، إلا أن معالجة وتحليل كميات ضخمة من البيانات يمتاز بتعقيد واحتياج إلى إمكانيات حاسوبية كبيرة، إضافة إلى استهلاك الوقت، خاصة عند تحليل سلاسل زمنية طويلة ومتعددة المصادر (Weng, 2012; Jensen, 2015).

في السنوات الأخيرة، برزت منصة (GEE) Google Earth Engine كحل تقني مبتكر تجاوز العديد من قيود الطرق التقليدية، إذ توفر بيئة حوسبة سحابية تعتمد على البنية التحتية لجوجل لمعالجة كميات هائلة من بيانات الاستشعار عن بُعد بشكل مباشر دون الحاجة إلى تحميل الصور أو معالجتها محلياً (Gorelick et al., 2017). وتكمن قوة GEE في احتوائها على أرشيف ضخم من صور الأقمار الصناعية مثل Landsat و Sentinel، إلى جانب مكتبات برمجية بلغة JavaScript و Python تُتيح تنفيذ خوارزميات متقدمة للتصنيف وتحليل التغير الزمني بسهولة وكفاءة. هذا وقد أظهر التحليل الببليومتري لمنصة GEE خلال الفترة ٢٠١١-٢٠٢٢ والذي أجراه Velastegui-Montoya et al., 2023، تزايد استخدامها في مجالات الاستشعار عن بُعد، الأقمار الصناعية، تعلم الآلة Machin learning، وتغير استخدامات الأراضي، مما يؤكد دورها كأداة ناشئة لإدارة البيانات الضخمة وتعدد تطبيقاتها المعرفية. كما استعرض Arévalo et al., 2020 تطوير أدوات مجانية لمعالجة مخرجات خوارزمية CCDC عبر GEE، مما سهل تحليل تغيرات الغطاء الأرضي باستخدام بيانات سلسلة زمنية وتحقيق تقديرات دقيقة للمساحات المتغيرة. إضافةً على ذلك، فإن منصة GEE تدعم التكامل مع بيانات اجتماعية ومناخية وبيئية ما يعزز من قدرتها على إجراء دراسات متعددة الأبعاد حول التحضر، التغير المناخي، وإدارة الموارد (Gorelick et al., 2017). في المقابل، يظل الاستخدام التقليدي قائماً في بعض السياقات التي تتطلب تحكماً دقيقاً بالمعالجة أو تتضمن بيانات ميدانية غير متوفرة ضمن GEE، إلا أن اتجاهات البحث الحديثة تؤكد أن المستقبل يميل أكثر نحو الحلول السحابية.

تتطلب هذه الدراسة من إدراك الحاجة إلى تحليل موضوعي ومقارن لتغيرات الغطاء الأرضي في مدينتي الرياض وتونس الكبرى بين عامي ١٩٨٤ و ٢٠٢٤، وتوظيف بيانات الأقمار الصناعية متعددة المصادر ضمن إطار زمني طويل للكشف عن الأنماط المكانية للتغيرات. كما تسعى الدراسة إلى الاستفادة من

الإمكانات المتطورة لمنصة GEE لتطبيق منهجية تصنيف متقدمة تعتمد على خوارزميات تعلم الآلة، مثل خوارزمية (Random Forest (RF، مما يعزز من دقة النتائج ويسهل استخدامها في دعم خطط التنمية الحضرية المستدامة.

٢ - أسئلة البحث

يمكن صياغة أسئلة البحث كما يأتي:

١. ما أنماط التغيرات في الغطاء الأرضي في مدينتي الرياض وتونس الكبرى خلال الفترة من ١٩٨٤ إلى ٢٠٢٤؟
٢. كيف يمكن تمثيل هذه التغيرات من خلال الخرائط المستخرجة من بيانات الاستشعار عن بعد؟
٣. كيف يمكن الاستفادة من نتائج تحليل تغيرات الغطاء الأرضي في دعم سياسات التخطيط الحضري والإدارة البيئية المستدامة؟

٣ - أهداف البحث وأهميته

يهدف هذا البحث إلى:

١. تحليل تغيرات الغطاء الأرضي في مدينة الرياض ومدينة تونس خلال الفترة ١٩٨٤-٢٠٢٤ باستخدام بيانات الاستشعار عن بعد.
٢. إنتاج خرائط زمنية دقيقة توضح التغيرات المكانية في الغطاء الأرضي في المدينتين.
٣. تقييم العوامل الطبيعية والبشرية المؤثرة على أنماط التغيرات في الغطاء الأرضي.
٤. تقديم بيانات تحليلية تدعم التخطيط الحضري المستدام والإدارة البيئية للمدينتين .

يحاول هذا البحث تحسين فهم التغيرات التي طرأت على الغطاء الأرضي في مدينتي الرياض وتونس، مما يساعد على تطوير سياسات حضرية أكثر كفاءة واستدامة. كما أن استخدام الخرائط الزمنية يوفر أداة تحليلية بصرية تسهم في فهم الاتجاهات بعيدة المدى لهذه التغيرات، مما يسهل على المخططين وصناع القرار اتخاذ قرارات مبنية على بيانات دقيقة. بالإضافة إلى ذلك، فإن توظيف تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية يتيح إمكانية رصد التحولات المستقبلية للغطاء الأرضي، مما يدعم جهود الحفاظ على الموارد البيئية والتنمية المستدامة في المدن.

٤- الدراسات السابقة

تم تناول استخدام الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية في العديد من الدراسات لدراسة وتحليل تغيرات الغطاء الأرضي. ففي المملكة العربية السعودية، قام (Alqurashi & Kumar (2014 بدراسة تغيرات استخدام الأرض والغطاء الأرضي في مدينتي مكة والطائف باستخدام بيانات الأقمار الصناعية، حيث تم تقييم التغيرات في المدينتين من عام ١٩٨٦ إلى عام ٢٠١٣ باستخدام بيانات القمر الصناعي LANDSAT. أظهرت النتائج زيادة في المساحات الحضرية بنحو ١٧٤٪ في مكة و١١٣٪ في الطائف خلال هذه الفترة، كما أظهر تحليل الغطاء النباتي تغيرات سنوية مرتبطة بتقلبات هطول الأمطار. وأكدت الدراسة أن الاستشعار عن بعد عبر الأقمار الصناعية يعد أداة أساسية في فهم العلاقة بين النمو السكاني والتغيرات في استخدام الأراضي، مما يساعد في التخطيط المستقبلي

والتعامل مع التأثيرات البيئية للمناطق الحضرية المتوسعة. وفي دراسة أخرى، تناول Rahman (2016) التوسع الحضري والزحف العمراني في مدينة الخبر باستخدام تصنيف صور Landsat وتطبيق تقنيات تصنيف خاضعة وغير خاضعة للإشراف، حيث أظهرت النتائج زيادة المساحات المبنية بنسبة ٩٠٪ في الأجزاء الغربية والجنوبية الشرقية والشمالية من المدينة بين عامي ١٩٩٠ و ٢٠٠٩، مما أشار إلى توسع المدينة نحو ضواحيها. كما قام Darem وزملاؤه (٢٠٢٣) بتطوير خريطة لتصنيف استخدامات الأراضي في المنطقة الشمالية للمملكة العربية السعودية باستخدام تقنيات متقدمة.

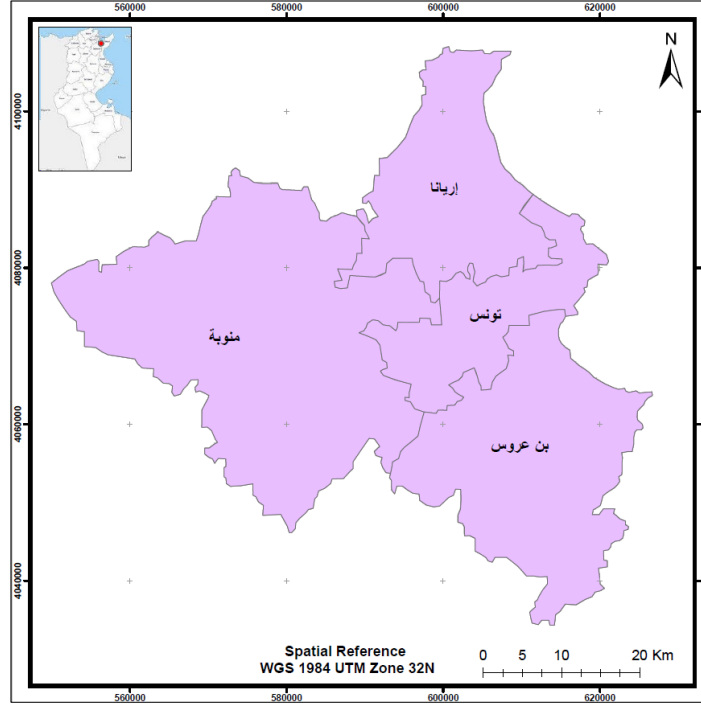
في الأردن، قامت دراسة عبد الجواد والبلبيسي (٢٠١٩) بتحليل تغيرات أنماط الغطاء الأرضي واستخداماته في لواء الموقر خلال الفترة من ١٩٨٩ إلى ٢٠١٤ باستخدام مؤشري NDVI و NDBI، مما أسفر عن إنشاء قاعدة بيانات جغرافية رقمية للغطاء الأرضي، بما في ذلك خارطة للأراضي الزراعية المتدهورة بيئياً. وفي العراق، تناولت دراسة الخاقاني وتقي (٢٠١٤) التغيرات في غطاء الأرض باستخدام تقنيات الاستشعار عن بعد، حيث تم تحليل البيانات باستخدام المؤشرات الطيفية مثل NDVI و NDBI و NDWI لتصنيف المناطق إلى ثلاثة أصناف رئيسية هي النباتات، الأجسام المائية، والأراضي الحضرية. كما أظهرت الدراسة أن هذه التقنيات توفر تحليلاً دقيقاً للتغيرات في غطاء الأرض في مناطق معينة. أما في تونس، فقد تناولت دراسة Ben Messaoud et al. (2024) العلاقة بين التوسع الحضري والبنية التحتية الخضراء في منطقة تونس الكبرى، حيث أظهرت نتائج الدراسة زيادة المساحات المبنية من ٨,٨٪ في عام ٢٠٠٠ إلى ١٢,١٪ في

عام ٢٠٢٠، في حين انخفضت المساحات الخضراء من ٢٣٪ إلى ٢٠,٩٪ خلال نفس الفترة، مما أشار إلى تزايد التجزئة والفوضوية في تخطيط المساحات الخضراء على الصعيد العالمي، تناولت دراسات عديدة تغيرات استخدام الأراضي في مناطق متنوعة. فقد قامت دراسة Abebe & Getachew و Ewunetu (2022) بتحليل التغيرات في استخدام الأراضي في منطقة جوبالافيتو شمال شرق إثيوبيا باستخدام تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية. كما تناولت دراسة Bera & Chamling (2020) تغيرات استخدام الأراضي في منطقة التلال بين بوتان وبنغلاديش، مشيرة إلى أهمية تطبيقات الجغرافيا المكانية في السياسات البيئية. كما أظهرت دراسة Kouassi et al. (2021) تقيماً لتغيرات استخدام الأراضي في جنوب غرب كوت ديفوار، مع التركيز على إزالة الغابات وتدهور الأراضي. وفي سلوفاكيا، قامت دراسة Robert & Janine (2017) بتحليل التغيرات في استخدام الأراضي عبر الزمن، مع التركيز على الاتجاهات المستقبلية في الدراسات البيئية. كما قامت دراسات أخرى بمقارنة بين مستشعرات Landsat 8 و 9، مثل دراسة Shahfahada et al., (2023)، التي قيمت أداء هذه الأقمار الصناعية في رسم خرائط الغطاء الأرضي. بالإضافة إلى ذلك، قدمت دراسة Paul (2014) تحليلاً لتغيرات استخدام الأراضي في حوض نهر كيسكاتينا باستخدام تقنيات النمذجة المكانية والاستشعار عن بعد، بينما تناولت دراسة Solaimani et al., (2010) تأثير التوسع الزراعي على الغطاء الأرضي في حوض نكا. أما Gaur & Singh (2023)، فقد قدما مراجعة شاملة حول نمذجة تغيرات استخدام الأراضي في المناطق الحضرية.

فيما يتعلق بمنصة Google Earth Engine، فقد أشارت دراسة Gorelick et al. (2017) إلى الإمكانيات الكبيرة لهذه المنصة في معالجة وتحليل البيانات الفضائية بشكل تفاعلي وفوري، فيما ناقش (Zhu & Woodcock 2014) إمكانية دمج خوارزميات تعلم الآلة في عمليات التصنيف داخل GEE لتحسين دقة النتائج.

يهدف بحثنا إلى إجراء تحليل مقارنة لتغيرات الغطاء الأرضي في مدينتي الرياض وتونس بين عامي ١٩٨٤ و ٢٠٢٤ باستخدام بيانات الأقمار الصناعية متعددة المصادر. تم تطبيق هذه المنهجية في دراسات سابقة، مثل تلك التي تناولت التوسع الحضري في الرياض باستخدام Landsat وتقنيات التصنيف المتقدم، ودراسة التغيرات في استخدام الأراضي في تونس باستخدام الاستشعار عن بعد. ما يميز بحثنا هو استخدام تقنيات حديثة مثل Google Earth Engine (GEE) التي تسهل تحليل البيانات الفضائية الضخمة وتحسين دقة النتائج من خلال خوارزميات تعلم الآلة مثل Random Forest (RF)، كما يركز البحث على التنمية الحضرية المستدامة في الرياض وتونس، مما يجعل نتائجه قابلة للتطبيق في التخطيط العمراني. من خلال المقارنة بين المدينتين، يقدم البحث رؤى حول الأنماط المكانية لتغيرات الغطاء الأرضي، مما يساعد في وضع توصيات للمخططين وصانعي السياسات في كلا البلدين.

أما مدينة تونس، والتي غالباً ما يشار إليها باسم تونس الكبرى، فهي عاصمة الجمهورية التونسية وتقع عند خط عرض ٣٦,٨٠٦٥ درجة شمالاً وخط طول ١٠,١٨١٥ درجة شرقاً الشكل (٢)). تقع المدينة في الشمال الشرقي من دولة تونس على الساحل المتوسطي، وتتميز بمناخ متوسطي معتدل وتضاريس تجمع بين السواحل والمرتفعات (Bellert et al., 2021). تغطي تونس الكبرى مساحة تبلغ حوالي ٢٦ كيلو متر مربع، أي ما يعادل ٢% من إجمالي مساحة البلاد، وتضم حوالي ٢,٧ مليون نسمة. تتألف تونس الكبرى من أربع ولايات، وهي: أريانة، بن عروس، منوبة، وتونس، وهي تُعد المركز الحضري والاقتصادي الأهم في الجمهورية التونسية، وقد شهدت تونس الكبرى خلال العقود الأخيرة نمواً عمرانياً سريعاً أدى إلى انتشار الأحياء العشوائية وتقلص الأراضي الزراعية، مما دفع السلطات إلى تبني برامج لإعادة تأهيل الأحياء السكنية وتحسين البنية التحتية الحضرية ضمن توجه يوازن بين متطلبات التنمية والمحافظة على البيئة (Bakari & EI WERIEMMI, 2024).



المصدر: من إعداد الباحثة.

الشكل (2). التقسيم الإداري لمدينة تونس الكبرى.

٥-٢- مصطلحات البحث

١- التحضر والتوسع العمراني

شهدت المدن الكبرى في العالم، ومنها مدينتي الرياض وتونس، نمواً حضرياً سريعاً خلال العقود الأخيرة، تجلّى الأثر في توسع النطاق الحضري على حساب الأراضي الطبيعية والزراعية (Seto et al., 2013). ويُعد التوسع العمراني ظاهرة مكانية وزمانية مركبة، تتأثر بالعوامل السكانية والاقتصادية والسياسات التخطيطية، وتُحدث تأثيرات متعددة على البيئة والاستخدامات الأرضية (Angel et al., 2016) وتشكل دراسة هذا التوسع مدخلاً لفهم التحولات في البنية الحضرية واتجاهات التنمية في المدن.

٢ - استخدامات الأراضي والغطاء الأرضي (Land Use / Land Cover)

يشير مفهوم "استخدامات الأراضي" إلى الأنشطة البشرية التي تُمارس على سطح الأرض مثل الزراعة والعمارة، بينما يعبر "الغطاء الأرضي" عن الخصائص الفيزيائية الظاهرة على سطح الأرض كالغابات والمياه والمناطق المبنية (Muriithi, 1976) وتُعد خرائط استخدامات الأراضي والغطاء الأرضي أدوات مركزية في التحليل الجغرافي المكاني، إذ تتيح فهم التغيرات التي تطرأ على البيئة الحضرية والطبيعية (Yang et al., 2017) ويؤدي تحليل التغير في LU/LC دوراً مهماً في دعم اتخاذ القرار على مختلف المستويات التخطيطية والبيئية.

٣ - تصنيف الصور وخوارزمية الغابة العشوائية (Random Forest)

يمثل تصنيف الصور مرحلة أساسية في تحليل المرئيات الفضائية، ويُستخدم لتحويل البيانات الرقمية إلى معلومات مكانية تُعبر عن أنواع الغطاء الأرضي. وتُعد خوارزمية الغابة العشوائية (Random Forest) إحدى أبرز خوارزميات تعلم الآلة المستخدمة في هذا السياق، إذ تعتمد على بناء مجموعة من الأشجار العشوائية لاتخاذ قرارات تصنيف دقيقة وفعالة (Breiman, 2001). يتم بناء كل شجرة عبر اختيار عينة فرعية عشوائية من بيانات التدريب مع السماح بالاستبدال، مما يعني أن بعض العينات قد تُختار أكثر من مرة بينما قد لا تُختار عينات أخرى (Belgiu & Drăguț, 2016). حوالي ثلث بيانات التدريب لا تُستخدم في بناء الأشجار، بل تُوظف لاحقاً لتقييم أداء النموذج ويتم اتخاذ القرار النهائي لتصنيف كل بكسل بناءً على تصويت غالبية الأشجار، حيث يتم اختيار الفئة التي تحصل على أكبر عدد من الأصوات. إن توافق خوارزمية RF مع منصات الحوسبة السحابية، مثل منصة Google Earth Engine (GEE)، يُسهم في تسريع معالجة البيانات الضخمة وإجراء التصنيفات بكفاءة عالية ضمن أطر زمنية معقولة، مما يجعلها مناسبة تماماً لأهداف دراستنا التي تعتمد على تحليل سلاسل زمنية طويلة لمرئيات فضائية متعددة المصادر.

٤- تحليل التغير الزمني

يشير تحليل التغير الزمني إلى مقارنة بيانات من فترات زمنية مختلفة بهدف الكشف عن التغيرات التي طرأت على الأرض خلال مدة معينة. وتُستخدم هذه التقنية في دراسة التغيرات البيئية والعمرانية من خلال مقارنة الخرائط المصنفة للسلاسل الزمنية (Lu et al., 2013). وتُعد هذه المنهجية ذات أهمية خاصة في الدراسات طويلة الأمد كدراستنا الراهنة التي تغطي أربعة عقود، مما يتيح رصد اتجاهات التحول بدقة عالية.

٥- منصة Google Earth Engine

تُعد منصة Google Earth Engine (GEE) بيئة حوسبة سحابية قوية طُورت لمعالجة وتحليل كميات هائلة من بيانات الاستشعار عن بعد عبر الإنترنت دون الحاجة إلى تحميلها محلياً (Gorelick et al., 2017) وتمتاز GEE بتوفيرها أرشيفاً غنياً من صور الأقمار الصناعية مثل Landsat و Sentinel، إلى جانب مكتبات برمجية بلغة JavaScript و Python تتيح تنفيذ خوارزميات تحليل متقدمة بسهولة. وقد أثبتت فعالية هذه المنصة في العديد من الدراسات، مثل دراسة (Al-Suhaili, 2020) التي أظهرت قدرة GEE على تقديم نتائج دقيقة مقارنة بالأساليب التقليدية، خاصة في معالجة سلاسل زمنية طويلة ومعقدة.

٦- التخطيط الحضري المستدام

يرتبط مفهوم التخطيط الحضري المستدام باستخدام البيانات المكانية لدعم قرارات عمرانية تراعي التوازن بين النمو الاقتصادي والحفاظ على البيئة وجودة الحياة (Jabareen, 2006). ويسهم تحليل التغيرات في الغطاء الأرضي بدور محوري في الكشف عن الممارسات غير المستدامة، ويُوفر مؤشرات مكانية لدعم صناع القرار في تبني سياسات أكثر فاعلية. ويزداد هذا الدور أهمية في ظل التحديات البيئية المتزايدة التي تواجه المدن الكبرى مثل الرياض وتونس الكبرى.

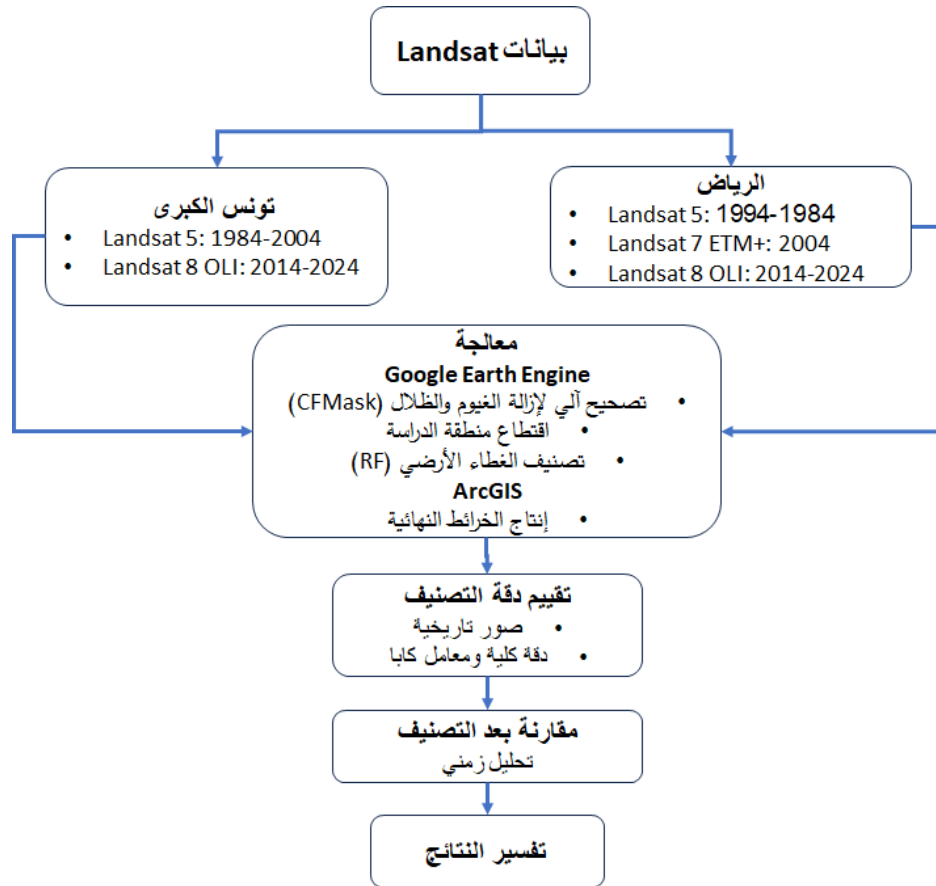
٣,٥. منهجية البحث والحصول على البيانات

اعتمدت الدراسة على منهج كمي تحليلي يقوم على تحليل صور الأقمار الصناعية وتصنيفها باستخدام خوارزمية تعلم الآلة RF.

نوضح في الشكل (٣) منهجية العمل. بالنسبة للبيانات، فقد تم الاعتماد على بيانات برنامج Landsat بأنظمتها المختلفة. تتميز هذه الصور بدقة مكانية تبلغ ٣٠ متراً لمعظم الحزم الطيفية، ودقة زمنية دورية (تغطية كل ١٦ يوماً)، مما يجعلها مناسبة جداً لدراسة التغيرات طويلة الأمد في الغطاء الأرضي. في حالة مدينة تونس الكبرى تم استخدام صور Landsat 5 TM للفترة من عام ١٩٨٤ حتى ٢٠٠٤، و Landsat 8 OLI/TIRS للفترة من العام ٢٠١٤ حتى ٢٠٢٤. أما في حالة مدينة الرياض فقد تم استخدام صور Landsat 5 TM للفترة من عام ١٩٨٤ حتى ١٩٩٤، و Landsat 7 ETM+ للعام ٢٠٠٤ و Landsat 8 OLI/TIRS للفترة من العام ٢٠١٤ حتى ٢٠٢٤. أما فيما يخص المعالجة، فقد تم تحميل الصور ومعالجتها عبر منصة Google Earth Engine، حيث استُخدمت خوارزميات تصحيح تلقائي لإزالة الغيوم والظلال (مثل CFMask) لتحسين جودة المشاهد قبل التصنيف. كما جرى قص الصور بما يتناسب مع الحدود الجغرافية لمدينتي الرياض وتونس الكبرى. تم بعد ذلك إنجاز تصنيف الغطاء الأرضي، باستخدام خوارزمية الغابة العشوائية (RF) نظراً لما تتمتع به من كفاءة عالية في التعامل مع البيانات الطيفية المعقدة وتقليل مخاطر فرط المطابقة. خلال هذه العملية، جرى تدريب النموذج باستخدام عينات تدريبية ممثلة للفئات الأرضية المستهدفة. في مدينة تونس الكبرى شملت الفئات: المسطحات المائية، الغابات، المناطق العمرانية، الأراضي الخضراء، والأراضي المفتوحة. أما في مدينة الرياض، فشملت الفئات: المسطحات المائية، المناطق العمرانية، الأراضي

الخضراء، والأراضي المفتوحة، وذلك نظراً للطبيعة الجغرافية للرياض التي تفتقر إلى الغابات.

بعد الانتهاء من التصنيف، قمنا بتقييم دقته من خلال اختيار نقاط تحقق عشوائية ومقارنتها مع التصنيفات الناتجة، وتم حساب الدقة الكلية Overall Accuracy والمعامل كبا Kappa Coefficient لتقييم جودة النتائج. ونظراً لعدم توفر مخططات مرجعية رسمية للفترات التاريخية، تم الاعتماد على الصور الجوية التاريخية المتاحة عبر برنامج Google Earth Pro للتحقق الميداني من دقة التصنيف. تم بعد ذلك القيام بتحليل للتغيرات الزمنية عبر تطبيق طريقة تصنيف ما بعد المعالجة (Post Classification Comparison) لمقارنة النتائج المصنفة عبر الفترات المختلفة والكشف عن أنماط التحول في الغطاء الأرضي بين عامي ١٩٨٤ و ٢٠٢٤. ونشير هنا إلى أنه قد تم تنفيذ جميع المعالجات والتحليلات الأساسية عبر منصة GEE مع استخدام برنامج ArcGIS في بعض مراحل التحليل المكاني وإنتاج الخرائط النهائية، كما استند تحليل النتائج إلى تفسير الأنماط المكانية والزمانية للتغيرات المكتشفة، بهدف توفير مؤشرات كمية تدعم قرارات التخطيط الحضري والإدارة البيئية المستدامة.



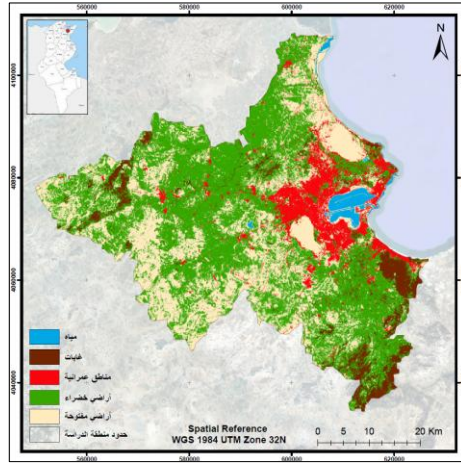
المصدر: من إعداد الباحثة.

الشكل (3). منهجية الدراسة.

٦- النتائج والمناقشة

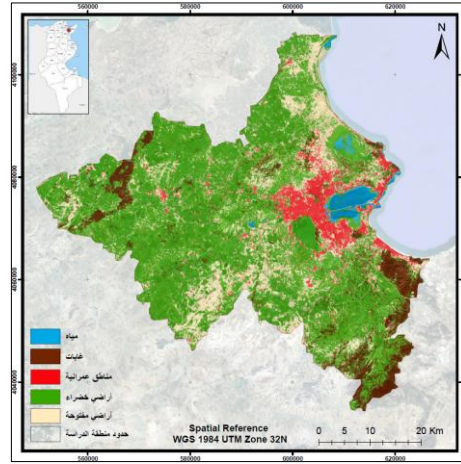
٦-١- استشعار التغيرات لمدينة تونس الكبرى

تم اشتقاق خرائط استخدام الأراضي/الغطاء الأرضي من خلال تصنيف الصور الفضائية Landsat التي تغطي مدينة تونس الكبرى خلال فترة الدراسة الممتدة من ١٩٨٤ إلى ٢٠٢٤ وذلك بمعدل صورة لكل عشرة أعوام باعتماد خوارزمية تعلم الآلة RF. توضح الأشكال (٤، ٥، ٦، ٧ و ٨) هذه الخرائط.



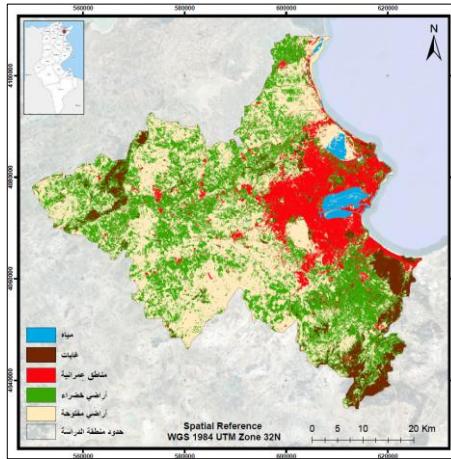
المصدر: من إعداد الباحثة.

الشكل (5). استخدام الأراضي/الغطاء الأرضي
عام ١٩٩٤ لمدينة تونس الكبرى



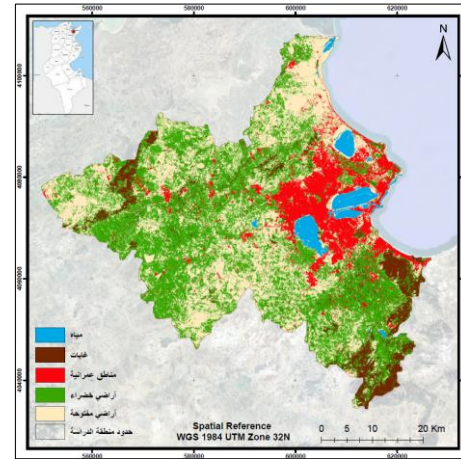
المصدر: من إعداد الباحثة.

الشكل (4). استخدام الأراضي/الغطاء الأرضي
عام ١٩٨٤ لمدينة تونس الكبرى



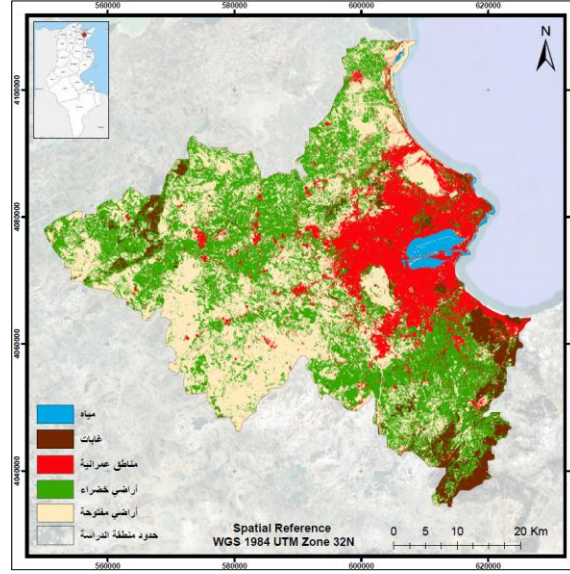
المصدر: من إعداد الباحثة.

الشكل (7). استخدام الأراضي/الغطاء الأرضي
عام ٢٠١٤ لمدينة تونس الكبرى



المصدر: من إعداد الباحثة.

الشكل (6). استخدام الأراضي/الغطاء الأرضي
عام ٢٠٠٤ لمدينة تونس الكبرى



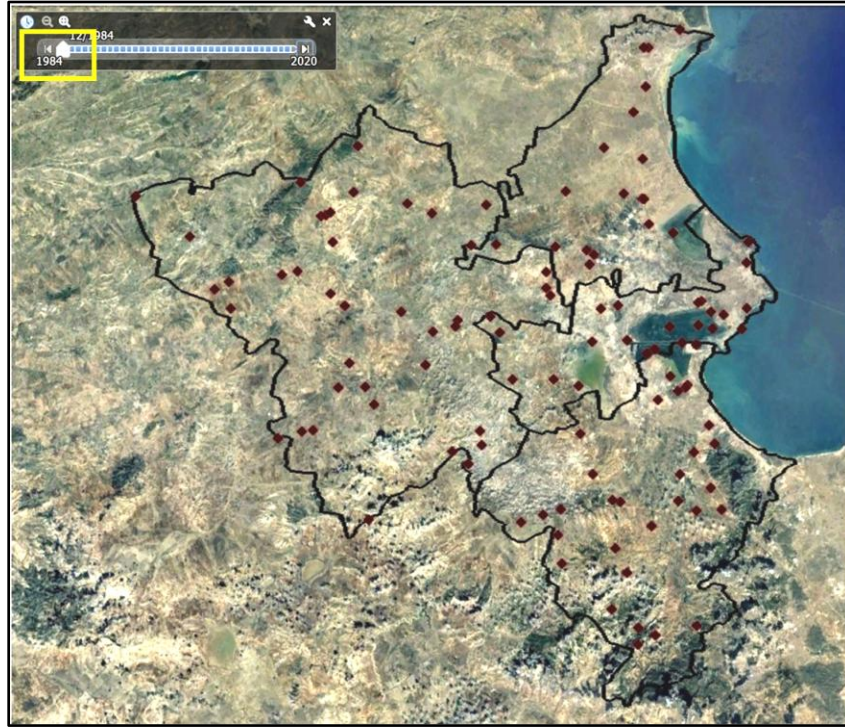
المصدر: من إعداد الباحثة.

الشكل (8). استخدام الأراضي/الغطاء الأرضي عام ٢٠٢٤ لمدينة تونس الكبرى

لتقييم دقة التصنيف لأعوام الدراسة، تمت الاستعانة بالمتصفح المجاني Google Earth وذلك لأنه يوفر مرئيات تاريخية تعود لنفس أعوام الدراسة. يوضح الشكل (٩) مثلاً عن العام ١٩٨٤. باستخدام هذه المرئيات، قمنا تعريف الأصناف الواقعية ومقارنتها لاحقاً مع الأصناف التي تنبأت بها خوارزمية التصنيف RF. ولتوليد مصفوفة الالتباس Confusion matrix أو الخطأ، تم استخدام 100 نقطة اختبار عشوائية موزعة بحيث يتناسب عدد النقاط مع مساحة هذا الصنف لمساحة كل صنف STRATIFIED_RANDOM. تم قياس هذه النقاط على المرئيات المصنّقة ومن ثم تم فتح الملف داخل Google Earth بعد تحويله إلى الصيغة KML ومقارنة هذه النقاط المصنّقة بالنقاط الحقيقية من المرئيات التاريخية. يبين الجدول (١) والشكل (١٠) نتائج هذا التقييم.

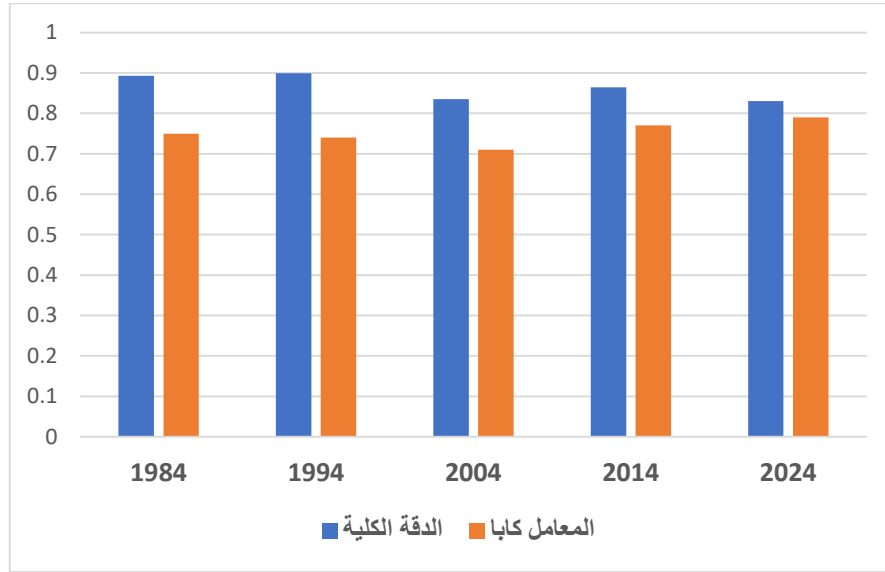
جدول (١): دقة التّصنيف المراقب باستخدام RF لمريّيات تونس الكبرى.

العام	الدقة الكلية (%)	المعامل كايا
١٩٨٤	٨٩,٢٩	0.89
١٩٩٤	٨٣,٩٢	٠,٧٧
٢٠٠٤	٨٣,٤٨	٠,٧٧
٢٠١٤	٨٦,٤٧	٠,٨١
٢٠٢٤	٨٣,٠٤	٠,٧٧



المصدر: من إعداد الباحثة.

الشكل (9). قياس النقاط الممثلة للأصناف الحقيقية على المرئية Google Earth لمدينة تونس الكبرى للعام ١٩٨٤.



المصدر: من إعداد الباحثة.

الشكل (10). قيم معاملات تقييم دقة التّصنيف المراقب لأعوام الدراسة باستخدام RF

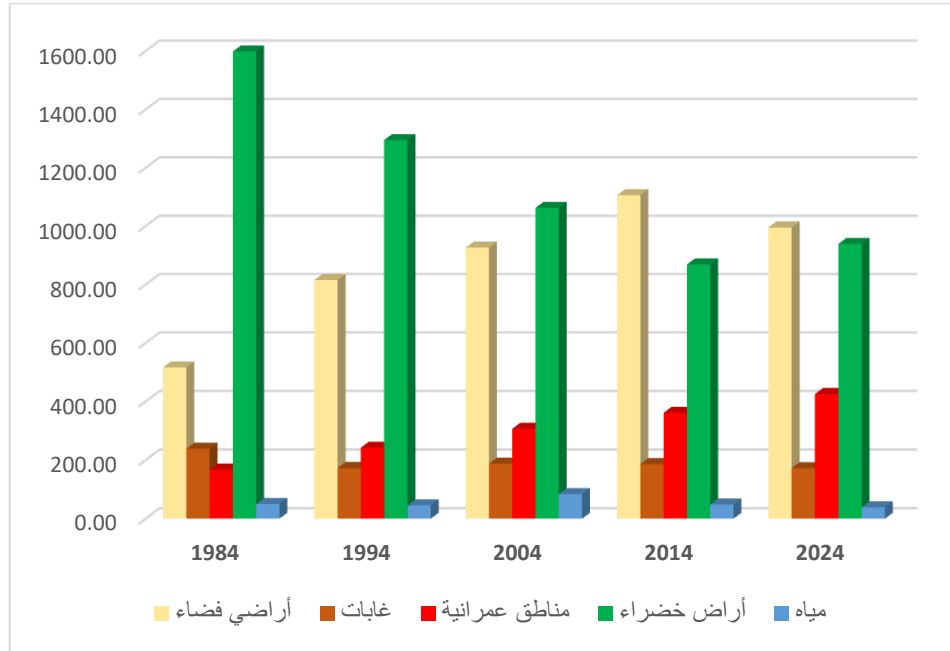
لمرئيات مدينة تونس الكبرى.

تُظهر نتائج تقييم دقة تصنيف الغطاء الأرضي باستخدام خوارزمية الغابة العشوائية (RF) (لمرئيات تونس الكبرى عبر السنوات المدروسة (الجدول (١) والشكل (١٠)) تذبذباً في الأداء، حيث تراوحت الدقة الكلية بين ٨٣,٠٤% و ٨٩,٢٩%. سُجلت أعلى دقة في عام ١٩٨٤ (٨٩,٢٩%)، وهذا يعكس وضوح المعالم الأرضية وقابلية تمييزها في تلك الفترة، في حين سُجلت أدنى دقة في عام ٢٠٢٤ (٨٣,٠٤%)، مما قد يُعزى إلى زيادة تعقيد المشهد الحضري أو تشابه الخصائص الطيفية بين الفئات المختلفة. أما فيما يخص معامل كابتا، فقد تراوح بين ٠,٧٧ و ٠,٨٩، وهو ما يشير إلى اتفاق جيد إلى قوي بين التصنيف والمرجعيات المعتمدة، إذ تُعد القيم الأعلى من ٠,٧٥ مؤشراً على تصنيف موثوق وفقاً للأدبيات العلمية. ويلاحظ أن السنوات ١٩٩٤، ٢٠٠٤، و ٢٠٢٤ سجلت نفس قيمة كابتا (٠,٧٧)، مما يعكس ثباتاً نسبياً في أداء الخوارزمية رغم تغير خصائص الصور الفضائية عبر الزمن. بينما شهد عام ٢٠١٤ تحسناً نسبياً في كل من الدقة

الكلية (٨٦,٤٧%) ومعامل كابا (٠,٨١)، مما قد يدل على تحسن جودة الصور أو تمايز الفئات الأرضية في تلك الفترة. وبشكل عام، تظهر النتائج أداءً جيداً لخوارزمية RF، مع تذبذب بسيط يعزى إلى تغير خصائص الصور الفضائية، وتعتد استخدامات الأراضي بمرور الوقت. إن هذه النتائج تدعم موثوقية البيانات المصنفة في تتبع التغيرات الزمنية في استخدامات الأراضي ضمن بيئة حضرية ديناميكية مثل تونس الكبرى.

نوضح في الجدول (٢) والشكل (11) نتائج التصنيف المراقب لاستعمال الأراضي/الغطاء الأرضي لمدينة تونس الكبرى للفترة من ١٩٨٤ إلى ٢٠٢٤ مع توضيح المساحة بالكيلومتر المربع والنسبة المئوية الخاصة بكل صنف. الجدول (2). استعمال الأراضي/الغطاء الأرضي من ١٩٨٤ إلى ٢٠٢٤ لمدينة تونس الكبرى مع المساحات والنسب المئوية للأصناف.

نوع استعمال الأراضي/الغطاء الأرضي	1984	1994	2004	2014	2024
المساحة (كم ^٢)	المساحة (كم ^٢)	المساحة (كم ^٢)	المساحة (كم ^٢)	المساحة (كم ^٢)	المساحة (كم ^٢)
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
مياه	50.5	2.0	45.2	1.8	83.9
غابات	238.7	9.3	173.0	6.7	187.8
مناطق عمرانية	167.2	6.5	242.5	9.4	306.8
أراض خضراء	1598.7	62.2	1295.1	50.4	1062.9
أراضي مفتوحة	516.4	20.1	815.6	31.7	926.7
الإجمالي	2570	100	2570	100	2570



المصدر: من إعداد الباحثة.

الشكل (11). مقارنة مساحات الأصناف الناتجة عن تصنيف المرئيات Landsat 8 للأعوام من ١٩٨٤ إلى ٢٠٢٤ بالكيلومتر المربع لمدينة تونس الكبرى.

تُظهر النتائج الخاصة بمدينة تونس الكبرى (الموضحة في الجدول (٢) والشكل (١١)) خلال الفترة الممتدة من ١٩٨٤ إلى ٢٠٢٤ تغيرات مكانية وزمانية بارزة في أنماط استخدامات الأراضي. فقد ارتفعت مساحة الأراضي الفضاء بشكل ملحوظ من ٥١٦,٤ كيلومتر مربع، ما يمثل ٢٠,١% من المساحة الإجمالية سنة ١٩٨٤، إلى ١١٠٦,٢ كيلومتر مربع (٤٣%) سنة ٢٠١٤، ثم سجلت انخفاضاً طفيفاً إلى ٩٩٥,٦ كيلومتر مربع (٣٨,٧%) بحلول ٢٠٢٤. ويعكس هذا التطور تزايد الضغوط العمرانية خلال العقود الماضية، مع بؤادر استقرار نسبي في السنوات الأخيرة قد تكون ناتجة عن تدخلات تخطيطية أو بيئية. في المقابل، تراجعت المساحات الغابية من ٢٣٨,٧ كيلومتر مربع (٩,٣%) سنة ١٩٨٤ إلى ١٧٢,٣

كيلومتر مربع (٦,٧%) سنة ٢٠٢٤، ما يدل على تدهور تدريجي للغطاء النباتي الشجري تحت تأثير الامتداد الحضري والاستغلال المفرط للأراضي. أما المناطق العمرانية فقد شهدت نمواً ملحوظاً من ١٦٧,٢ كيلومتر مربع (٦,٥%) سنة ١٩٨٤ إلى ٤٢٥,٥ كيلومتر مربع (١٦,٦%) سنة ٢٠٢٤، مما يبرز بوضوح تسارع وتيرة التوسع العمراني والزيادة السكانية خلال الفترة المدروسة. وفيما يتعلق بالأراضي الخضراء، فقد انخفضت نسبتها من ٦٢,٢١% سنة ١٩٨٤ (بمساحة قدرها ١٥٩٨,٧٠ كيلومتر مربع) إلى ٣٣,٨% سنة ٢٠١٤ (٨٦٨,٩ كيلومتر مربع)، قبل أن تتحسن نسبياً إلى ٣٦,٥% سنة ٢٠٢٤ (٩٣٩,٢ كيلومتر مربع)، وهو ما قد يعكس اعتماد سياسات لتعزيز الغطاء النباتي وتحسين جودة البيئة الحضرية. أما المسطحات المائية فقد شهدت بدورها تراجعاً طفيفاً، حيث انخفضت من ٥٠,٥ كيلومتر مربع (٢%) سنة ١٩٨٤ إلى ٣٨,٨ كيلومتر مربع (١,٥%) سنة ٢٠٢٤، ويُحتمل أن يكون هذا التراجع مرتبطاً بالتغيرات المناخية أو بزيادة الضغوط البشرية على الموارد المائية.

بناءً على النتائج، يتضح أن السمة الغالبة على تطور استخدامات الأراضي في تونس الكبرى كانت التوسع العمراني، غالباً على حساب المساحات الطبيعية، وهو ما يستدعي تعزيز برامج التخطيط العمراني المستدام والحفاظ على التوازن البيئي لضمان تنمية حضرية متوازنة في المستقبل.

من خلال تحليل خرائط استخدامات الأراضي لتونس الكبرى خلال الفترة من عام ١٩٨٤ إلى عام ٢٠٢٤، يتبين أن هناك توسعاً عمرانياً Urban Sprawl مستمراً ومتزايداً على مر السنين، حيث شهدت المساحات المبنية زيادة ملحوظة، إذ كانت المناطق العمرانية في عام ١٩٨٤ محدودة ومتمركزة في نواة المدينة، لكنها انتشرت تدريجياً نحو الأطراف مع حلول عام ٢٠٢٤. ويتضح أن اتجاه التوسع كان نحو الضواحي والمناطق المحيطة بالمركز الحضري، مما يشير

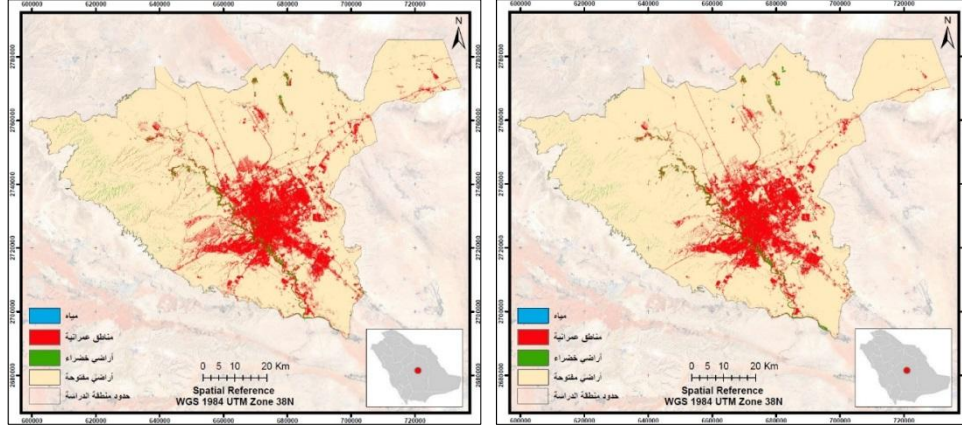
إلى ظاهرة التمدد العمراني، وهي ظاهرة قد تكون ناجمة عن عدة عوامل من أبرزها النمو السكاني، وتحسين البنية التحتية، والهجرة من المناطق الريفية إلى الحضرية. كما تُظهر الخرائط تغيراً في أنماط استخدام الأراضي، حيث تحولت العديد من المناطق الخضراء أو الزراعية إلى مناطق سكنية أو صناعية، ولا سيما في الفترة الممتدة من عام ٢٠٠٤ إلى عام ٢٠٢٤، مما أدى إلى تقلص المساحات المفتوحة لصالح التوسع العمراني. وقد كان التوسع بين عامي ١٩٨٤ و ١٩٩٤ بطيئاً نسبياً، إلا أنه تسارع بشكل واضح بعد عام ٢٠٠٤ وبلغ ذروته بحلول عام ٢٠٢٤، مما يوحي بأن التحولات الاقتصادية أو السياسية في تونس خلال القرن الحادي والعشرين قد ساهمت في تسريع هذه الظاهرة.

تتوافق هذه النتائج مع ما أظهرته دراسات حديثة (Ben Messaoud et al., 2024)، والتي بيّنت أن المركز الحضري الأصلي (المدينة القديمة أو النواة) كان مركز التوسع، ومنه بدأ الانتشار إلى الأطراف. كما تتوافق النتائج من ناحية أن المساحات الخضراء قد شهدت تقلصاً ملحوظاً، نتيجة لتحول الأراضي الطبيعية والزراعية إلى استعمالات عمرانية، وهو ما يتماشى مع الملاحظات المسجلة في الفترات السابقة. بناءً عليه، تؤكد نتائج هذا البحث، بالاقتران مع الدراسات السابقة، أن التوسع العمراني في تونس الكبرى اتسم بالاستمرارية، التسارع، والانتشار العشوائي نسبياً، خصوصاً بعد عام ٢٠٠٤، مما يبرز الحاجة إلى تفعيل خطط عمرانية أكثر شمولاً واستدامة للحد من تدهور الموارد الطبيعية ومواجهة التحديات البيئية والاجتماعية المرتبطة بالتوسع الحضري غير المنظم.

٦-٢- استشعار التغيرات لمدينة الرياض

كما في حالة تونس الكبرى، تم اشتقاق خرائط استخدام الأراضي/الغطاء الأرضي (الأشكال ١٠، ١١، ١٢، ١٣ و ١٤) من خلال تصنيف الصور الفضائية

Landsat التي تغطي مدينة الرياض الكبرى خلال فترة الدراسة الممتدة من ١٩٨٤ إلى ٢٠٢٤ وذلك بمعدل صورة لكل عشرة أعوام باعتماد خوارزمية تعلم الآلة RF.

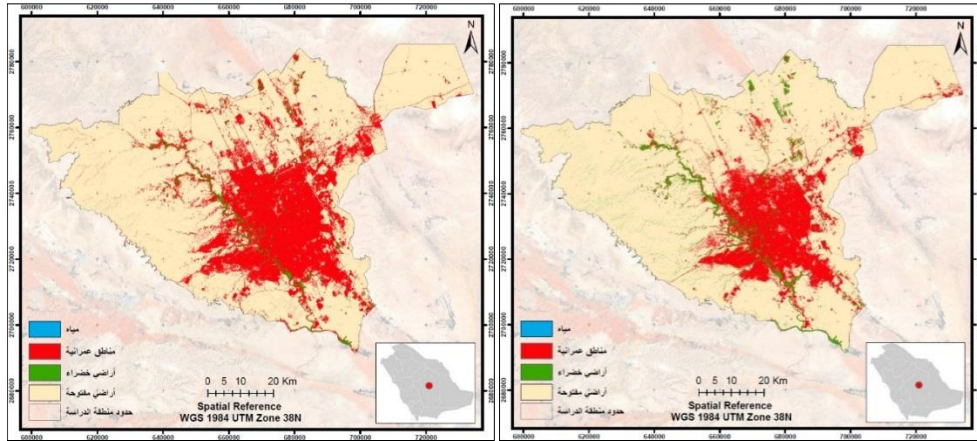


المصدر: من إعداد الباحثة.

المصدر: من إعداد الباحثة.

الشكل (13). استخدام الأراضي/الغطاء الأرضي
عام ١٩٩٤ لمدينة الرياض

الشكل (12). استخدام الأراضي/الغطاء الأرضي
عام ١٩٨٤ لمدينة الرياض

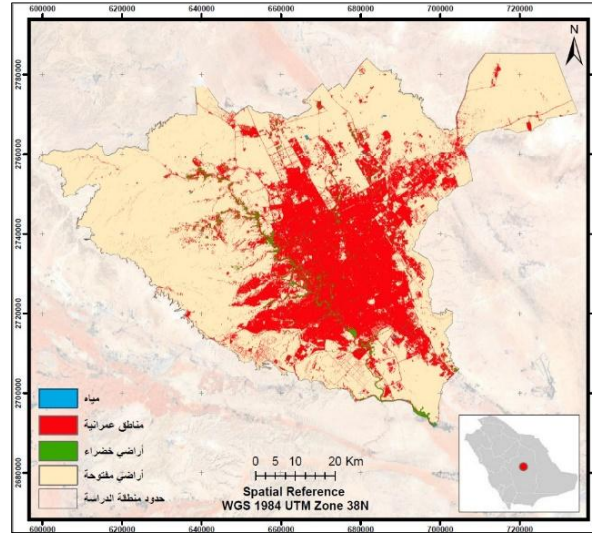


المصدر: من إعداد الباحثة.

المصدر: من إعداد الباحثة.

الشكل (15). استخدام الأراضي/الغطاء الأرضي
عام ٢٠١٤ لمدينة الرياض

الشكل (14). استخدام الأراضي/الغطاء الأرضي
عام ٢٠٠٤ لمدينة الرياض

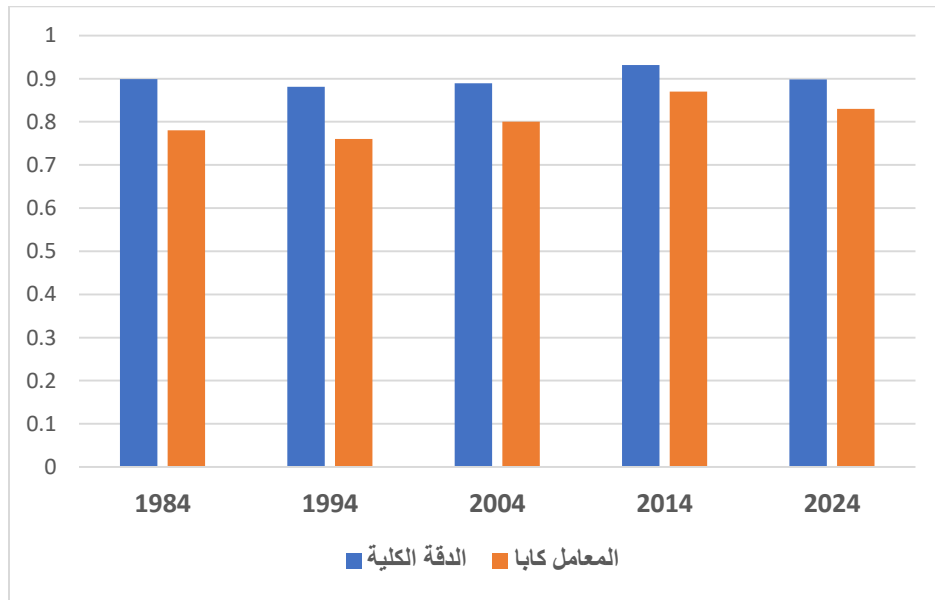


المصدر: من إعداد الباحثة.

الشكل (16). استخدام الأراضي/الغطاء الأرضي عام ٢٠٢٤ لمدينة الرياض

تم بعد ذلك تقييم دقة التصنيف باتباع نفس الآلية التي طبقناها في حالة تونس الكبرى. يبين الجدول (٣) والشكل (١٧) نتائج هذا التقييم.
جدول (٣): دقة التّصنيف المراقب باستخدام RF لمريّيات الرياض.

المعامل كابا	الدقة الكلية (%)	العام
0.78	٨٩,٩٢	١٩٨٤
٠,٧٦	٨٨,١٤	١٩٩٤
٠,٨٠	٨٨,٨٩	٢٠٠٤
٠,٨٧	٩٣,١٦	٢٠١٤
٠,٨٣	٨٩,٨٣	٢٠٢٤



المصدر: من إعداد الباحثة.

الشكل (17). قيم معاملات تقييم دقة التصنيف المراقب لأعوام الدراسة باستخدام RF لمرئيات مدينة الرياض.

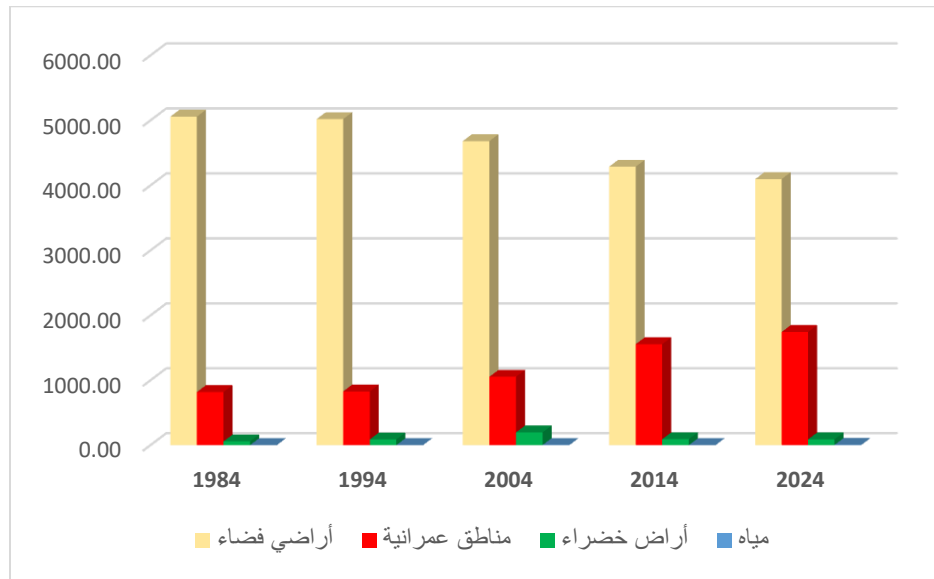
نلاحظ من الجدول (٣) والشكل (١٧) أن الدقة الكلية في عام ١٩٨٤ بلغت ٨٩,٩٢%، ومعامل كابا ٠,٧٨، مما يشير إلى بداية جيدة في أداء التصنيف باستخدام خوارزمية الغابة العشوائية، مع درجة مقبولة من الاتفاق بين التصنيف والواقع. في عام ١٩٩٤، انخفضت الدقة الكلية إلى ٨٨,١٤%، وتراجع معامل كابا بشكل طفيف إلى ٠,٧٦، وهو ما قد يعكس استقراراً نسبياً في أداء التصنيف، لكنه قد يشير أيضاً إلى تحديات في التمييز بين بعض الفئات نتيجة التغيرات في أنماط استخدام الأرض. أما في عام ٢٠٠٤، فقد شهدت النتائج تحسناً بسيطاً، حيث ارتفعت الدقة الكلية إلى ٨٨,٨٩%، وارتفع معامل كابا إلى ٠,٨٠، مما يعكس تقدماً طفيفاً في دقة التصنيف وجودته مقارنة بالعام السابق. في عام ٢٠١٤، تحققت أفضل النتائج خلال الفترة المدروسة، حيث وصلت الدقة الكلية إلى ٩٣,١٦% ومعامل كابا إلى ٠,٨٧، ما يشير إلى أداء ممتاز مع درجة عالية

من التوافق بين التصنيف والواقع، ويُحتمل أن يعود هذا التحسن إلى توفر صور ذات جودة عالية وبيانات تدريبية أكثر تمثيلاً. وأخيراً، في عام ٢٠٢٤، تراجعت الدقة الكلية إلى ٨٩,٨٣% ومعامل كابا إلى ٠,٨٣، ورغم هذا الانخفاض الطفيف، فإن النتائج لا تزال تعكس مستوى جيداً من الدقة والموثوقية. بصورة عامة، يُظهر الجدول أن الدقة الكلية ظلت فوق ٨٨% طوال الفترة المدروسة، ومعامل كابا حافظ على قيمته ضمن الحدود المقبولة (>0.75)، مما يدل على ثبات وموثوقية التصنيف باستخدام RF. ويُعزى التحسن في الأداء، خصوصاً في عام ٢٠١٤، إلى تطور تقنيات التصنيف الرقمي وجودة الصور الفضائية، وهو ما يؤكد أهمية الاستثمار في بيانات عالية الدقة وأساليب تصنيف متقدمة لتحسين مخرجات الخرائط الموضوعية.

نوضح في الجدول (٤) والشكل (١٨) نتائج التصنيف المراقب لاستعمال الأراضي/الغطاء الأرضي لمدينة الرياض للفترة من ١٩٨٤ إلى ٢٠٢٤ مع توضيح المساحة بالكيلومتر المربع والنسبة المئوية الخاصة بكل صنف.

الجدول (٤). استعمال الأراضي/الغطاء الأرضي من ١٩٨٤ إلى ٢٠٢٤ لمدينة الرياض مع المساحات والنسب المئوية للأصناف.

نوع استعمال الأراضي/الغطاء الأرضي	1984	1994	2004	2014	2024
المساحة (%) بالكم ٢	المساحة (%) بالكم ٢	المساحة (%) بالكم ٢	المساحة (%) بالكم ٢	المساحة (%) بالكم ٢	المساحة (%) بالكم ٢
مياه	2.6	0.04	1.3	0.02	4.0
مناطق عمرانية	819.8	13.80	829.1	13.96	1055.5
أراض خضراء	58.8	0.99	89.2	1.50	197.9
أراضي مفتوحة	5058.6	85.16	5020.4	84.52	4682.5
الإجمالي	5939.9	100	5939.9	100	5939.9



المصدر: من إعداد الباحثة.

الشكل (18). مقارنة مساحات الأصناف الناتجة عن تصنيف المرئيات Landsat 8 لمدينة الرياض للأعوام من ١٩٨٤ إلى ٢٠٢٤ بالكيلومتر المربع.

تُظهر النتائج الخاصة بمدينة الرياض (الموضحة في الجدول (٤) والشكل (١٨)) خلال الفترة الممتدة من ١٩٨٤ إلى ٢٠٢٤ تراجعاً تدريجياً في مساحة الأراضي الفضاء من ٥٠٥٨,٦ كيلومتر مربع، ما يمثل ٨٥,٢% من المساحة الإجمالية سنة ١٩٨٤، إلى ٤٠٩٨,٣ كيلومتر مربع (٦٨,٤%) سنة ٢٠٢٤، مما يعكس تسارع التوسع العمراني خلال العقود الأربعة الماضية، إذ تم استغلال مساحات واسعة من الأراضي الفضاء لصالح الأنشطة العمرانية والخدمية. في المقابل، شهدت المناطق العمرانية نمواً كبيراً، إذ ارتفعت مساحتها من ٨١٩,٨ كيلومتر مربع (١٣,٨%) سنة ١٩٨٤ إلى ١٧٤٦,١ كيلومتر مربع (٢٩,١%) سنة ٢٠٢٤، مما يعبر عن تضاعف حجم الكتلة الحضرية. أما الأراضي الخضراء، فقد سجلت ارتفاعاً محدوداً وغير منتظم، حيث ازدادت مساحتها من ٥٨,٨ كيلومتر مربع (٠,٩٩%) سنة ١٩٨٤ إلى ٩٠,٨ كيلومتر مربع (١,٥%) سنة ٢٠٢٤، مع ملاحظة بعض التقلبات خلال الفترات المختلفة، مما قد يعكس جهوداً متفاوتة في

مجال التشجير وتحسين البيئة الحضرية. فيما يتعلق بالمسطحات المائية، فقد بقيت محدودة طوال الفترة، إذ سجلت مساحة طفيفة بلغت ٢,٦ كيلومتر مربع (٠,٠٤%) سنة ١٩٨٤، ثم تذبذبت على نحو بسيط لتصل إلى ٤,٨ كيلومتر مربع (٠,٠٨%) سنة ٢٠٢٤، ما قد يدل على استمرار محدودية الموارد المائية السطحية بالمدينة. وبصورة عامة، يتضح أن النمط الغالب على تطور استخدامات الأراضي في مدينة الرياض هو الامتداد العمراني السريع على حساب الأراضي الفضاء، مع محاولات نسبية لتعزيز الغطاء الأخضر. هذا الواقع يفرض ضرورة تبني استراتيجيات تخطيطية مستدامة، توازن بين الحاجة للنمو الحضري وبين متطلبات الحفاظ على البيئة وجودة الحياة الحضرية، خصوصاً في ظل التوجهات المستقبلية لرؤية ٢٠٣٠ التي تطمح إلى بناء مدينة ذكية ومستدامة.

بناءً على تحليل خرائط استخدامات الأراضي لمدينة الرياض خلال الفترة الممتدة من عام ١٩٨٤ حتى عام ٢٠٢٤، يمكن استنتاج عدد من الاتجاهات الرئيسية التي ميزت التوسع العمراني في المدينة. فقد بدأت مرحلة التوسع الجغرافي من عام ١٩٨٤ حتى عام ١٩٩٤ مع ظهور الأحياء الجديدة خارج النواة القديمة للمدينة، خاصةً باتجاه المحاور الشمالية والشرقية. ثم تسارع النمو الحضري في الفترة من ١٩٩٤ إلى ٢٠٠٤ نحو الشمال. أما بين عامي ٢٠٠٤ و ٢٠١٤، فقد شهدت الرياض توسعاً عمرانياً ملحوظاً نحو الغرب وإلى الجنوب أيضاً. ومع دخول الفترة من ٢٠١٤ إلى ٢٠٢٤، استمر التوسع العمراني في جميع الاتجاهات.

تظهر نتائج هذه الدراسة توافقاً ملحوظاً مع نتائج دراسة (Alkhayyal 2017) من حيث تأكيد كلتا الدراستين على استمرار التوسع العمراني الكبير لمدينة الرياض خلال العقود الماضية مع اتساع ملحوظ في جميع الاتجاهات الجغرافية للمدينة، مما أدى إلى تحولها من مدينة مدمجة إلى متروبوليس واسع الامتداد إضافةً إلى رصد نمط من النمو المتفرق وغير المنتظم في العديد من الاتجاهات.

٦-٣ مقارنة تطور أنماط استخدامات الأراضي في مدينتي تونس الكبرى والرياض

عند مقارنة تطور أنماط استخدامات الأراضي في مدينتي تونس الكبرى والرياض بين عامي ١٩٨٤ و ٢٠٢٤، يتبين وجود قواسم مشتركة تتمثل في التوسع العمراني السريع على حساب الأراضي الطبيعية والأراضي المفتوحة، إلا أن وتيرة التغير ونمطه كانا مختلفين، تبعاً للخصوصيات الاجتماعية والاقتصادية والطبيعية لكل مدينة.

في تونس الكبرى، اتسم الامتداد الحضري بالاستمرارية وعدم الانتظام، مدفوعاً بالنمو السكاني والتحولات الاقتصادية، مع فقدان تدريجي للغطاء النباتي وظهور مؤشرات استقرار نسبي في السنوات الأخيرة، مما يعكس تأثير السياسات التخطيطية والبيئية الحديثة. وقد ساهمت طبيعة المنطقة، التي تجمع بين خصائص حضرية وزراعية، في حدوث تداخل واضح بين المناطق العمرانية والمساحات الخضراء، مما ضاعف من تحديات الحفاظ على التوازن البيئي.

أما في الرياض، فقد كان التوسع العمراني أكثر تنظيماً وسرعة، مدعوماً بسياسات حكومية طموحة ورؤية اقتصادية واضحة (رؤية ٢٠٣٠)، في ظل طبيعة صحراوية شحيحة الموارد المائية. تميزت الرياض بانتقال ممنهج من نواة المدينة إلى الأطراف، مع استغلال واسع للأراضي الفضاء وتطوير شامل للبنية التحتية. وعلى الرغم من الجهود المبذولة لزيادة المساحات الخضراء، إلا أن نسبة الغطاء النباتي بقيت محدودة مقارنة بالمساحة الإجمالية، وهو ما يعكس صعوبة تحقيق استدامة بيئية حقيقية ضمن بيئة طبيعية قاسية. بالتالي، يتضح أن العوامل المؤثرة في تغير أنماط استخدامات الأراضي في المدينتين تشمل النمو السكاني، والتطور الاقتصادي، والسياسات التخطيطية، بالإضافة إلى طبيعة المنطقة الجغرافية والمناخية. إلا أن الفوارق بينهما تكمن في سرعة التوسع، ومستوى التخطيط، ومدى النجاح في تحقيق التوازن بين التوسع الحضري والحفاظ على البيئة، ما يعكس خصوصية المسار التنموي لكل مدينة.

٧- خاتمة وتوصيات

قدمت هذه الدراسة تحليلاً للتغيرات المكانية والزمانية في أنماط الغطاء الأرضي لكل من مدينة الرياض ومدينة تونس الكبرى خلال الفترة الممتدة بين ١٩٨٤ و٢٠٢٤، بالاعتماد على بيانات الاستشعار عن بعد وتقنيات التصنيف المعتمدة على خوارزمية الغابة العشوائية (RF). أظهرت النتائج أن كلا المدينتين شهدتا تحولات بارزة، تمثلت أساساً في تسارع التوسع العمراني وتراجع المساحات الطبيعية، مما يعكس الضغوط المتزايدة على البيئة الحضرية نتيجة للنمو السكاني والتحول الاقتصادي والاجتماعي.

في مدينة تونس الكبرى، كشفت التحليلات عن ارتفاع نسبة الأراضي الفضاء من ٢٠,١% عام ١٩٨٤ إلى ٤٣% عام ٢٠١٤، مع انخفاض طفيف إلى ٣٨,٧% عام ٢٠٢٤، مما يدل على أنماط تمدد عمراني مستمرة. كما تراجعت المساحات الغابية من ٩,٣% إلى ٦,٧%، وانخفضت الأراضي الخضراء من ٦٢,٢١% إلى ٣٦,٥% خلال نفس الفترة، وهو مؤشر على فقدان الغطاء النباتي الطبيعي نتيجة للزحف العمراني. أما المناطق المبنية فقد ارتفعت من ٦,٥% إلى ١٦,٦%، مما يؤكد تسارع ظاهرة التوسع الحضري غير المخطط.

أما بالنسبة لمدينة الرياض، فكشفت التحليلات عن تراجع نسبة الأراضي الفضاء من ٨٥,٢% عام ١٩٨٤ إلى ٦٨,٤% عام ٢٠٢٤، مما يدل على تسارع عمليات التوسع العمراني. كما ارتفعت المناطق العمرانية من ١٣,٨% إلى ٢٩,١% خلال نفس الفترة، وهو ما يعكس تضاعف الكتلة الحضرية. في المقابل، سجلت الأراضي الخضراء زيادة طفيفة من ٠,٩٩% إلى ١,٥%، مع بقاء المسطحات المائية محدودة، حيث ارتفعت من ٠,٠٤% إلى ٠,٠٨%، مما يشير إلى استمرار الضغط الحضري وضعف نمو الموارد البيئية الطبيعية.

انطلاقاً من هذه النتائج، توصي الدراسة بضرورة تعزيز التخطيط العمراني المستدام عبر التحكم في التوسع الأفقي وتحفيز النمو الرأسّي، وزيادة المساحات الخضراء لمواجهة تراجعها الكبير، مع تطبيق سياسات صارمة لحماية الغابات

والمسطحات المائية من التدهور. كما تدعو إلى توسيع استخدام تقنيات الاستشعار عن بعد التي أثبتت فعاليتها بدقة تصنيف عالية في كل من الرياض وتونس الكبرى عام ٢٠٢٤، لدعم الرصد البيئي والتخطيط المستند إلى البيانات. وتؤكد على أهمية إجراء دراسات مستقبلية متكاملة تربط بين التغيرات البيئية والعوامل الاقتصادية والاجتماعية لدعم التنمية المستدامة، مع ضرورة تبني نهج متعدد التخصصات لمواجهة تحديات التغير المناخي والنمو السكاني في المدن الكبرى.

المراجع

المراجع الأجنبية

1. Abebe, G., Getachew, D., & Ewunetu, A. (2022). Analysing land use/land cover changes and its dynamics using remote sensing and GIS in Gubalafito District, Northeastern Ethiopia. *SN Applied Sciences*, 4(3), Article 30.
2. Adugna, T., Xu, W., & Fan, J. (2022). Comparison of random forest and support vector machine classifiers for regional land cover mapping using coarse resolution FY-3C images. *Remote Sensing*, 14, Article 574.
3. Al-Dulaimi, A., Al-Salih, H., & Al-Taie, M. (2019). *Land use and land cover change detection in Baghdad city using Landsat imagery and GIS*. Journal of Urban Planning and Development, 145(2), 04019007.
4. Alkhayyal, Z. (2017). Urban Growth Change Analysis of Riyadh, Saudi Arabia: 2005–2015. *Saint Mary's University of Minnesota University Central Services Press*, 20, 10.
5. Alqurashi, A. F., & Kumar, L. (2016). Spatiotemporal patterns of urban change and associated environmental impacts in five Saudi Arabian cities: A case study using remote sensing data. *Habitat International*, 58, 75-88.
6. Angel, S. H. L. O. M. O., Bleim, A., Civco, D., Galarza Sanchez, N., Lamson-Hall, P., Madrid, M. A. N. U. E. L., ... & Thom, K. E. V. I. N. (2015). Monitoring the quantity and quality of global urban expansion. *Marron Institute of Urban Management—New York University, NY*.

7. Arévalo, P., Bullock, E. L., Woodcock, C. E., & Olofsson, P. (2020). A suite of tools for continuous land change monitoring in google earth engine. *Frontiers in Climate*, 2, 576740.
8. Attri, P., Chaudhry, S., & Sharma, S. (2015). Remote sensing & GIS based approaches for LULC change detection—A review. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 5(5), 3126–3137.
9. Bakari, S., & El WERIEMMI, M. (2024). What drives Tunisian economic growth: urbanization or rural development?. *Theoretical & Applied Economics*, 31(2).
10. Belgiu, M., & Drăguț, L. (2016). Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 114, 24–31.
11. Bellert, F., Fila, K., Thoms, R., Hagenlocher, M., Harb, M., Cotti, D., ... & Garschagen, M. (2021). Application of remote sensing and GIS for risk assessment in Monastir, Tunisia. *Environmental remote sensing and GIS in Tunisia*, 191–210.
12. Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine learning*, 45, 5–32.
13. Chamling, M., & Bera, B. (2020). Spatio-temporal patterns of land use/land cover change in the Bhutan–Bengal foothill region between 1987 and 2019: Study towards geospatial applications and policy making. *Earth Systems and Environment*, 4, 117–130.
14. Darem, A. A., Alhashmi, A. A., Almadani, A. M., Alanazi, A. K., & Sutantra, G. A. (2023). Development of a map for land use and land cover classification of the Northern Border Region using remote sensing and GIS. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 26(2), 341–350.
15. Darem, A. A., Alhashmi, A. A., Almadani, A. M., Alanazi, A. K., & Sutantra, G. A. (2023). Development of a map for land use and land cover classification of the Northern Border Region using remote sensing and GIS. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 26(2), 341–350.
16. Gaur, S., & Singh, R. (2023). A comprehensive review on land use/land cover (LULC) change modeling for urban development: Current status and future. *Sustainability*, 15(1), Article 903.
17. 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*, 202, 18–27.
18. Jabareen, Y. R. (2006). Sustainable urban forms: Their typologies, models, and concepts. *Journal of planning education and research*, 26(1), 38–52.
19. Jensen, J. R. (2015). *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective* (4th ed.). Pearson.

20. Kouassi, J. L., Amos, G., Lucien, D., Yeboi, B., & Christophe, K. (2021). Assessing land use and land cover change and farmers' perceptions of deforestation and land degradation in South-West Côte d'Ivoire, West Africa. *Land*, 10, Article 429.
21. Lu, D., & Weng, Q. (2007). A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *International Journal of Remote Sensing*, 28(5), 823–870.
22. Lu, D., Li, G., Moran, E., & Hetrick, S. (2013). Spatiotemporal analysis of land-use and land-cover change in the Brazilian Amazon. *International journal of remote sensing*, 34(16), 5953-5978.
23. Mahmoud, S. H., & Gan, T. Y. (2019). Irrigation water management in arid regions of Middle East: Assessing spatio-temporal variation of actual evapotranspiration through remote sensing techniques and meteorological data. *Agricultural Water Management*, 212, 35-47.
24. Mathan, M., & Krishnaveni, M. (2020). Monitoring spatio-temporal dynamics of urban and peri-urban land transitions using ensemble of remote sensing spectral indices—A case study of Chennai metropolitan area, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, Article 15.
25. Muriithi, F. K. (2016). Land use and land cover (LULC) changes in semi-arid sub-watersheds of Laikipia and Athi River basins, Kenya, as influenced by expanding intensive commercial horticulture. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 3, 73-88.
26. Paul, S. S. (2014). Analysis of land use and land cover change in Kiskatinaw River watershed: A remote sensing, GIS & modeling approach (Master's thesis, University of Northern British Columbia). <https://unbc.arcabc.ca/islandora/object/unbc%3A19706>
27. Rahman, M. T. (2016). Detection of land use/land cover changes and urban sprawl in Al-Khobar, Saudi Arabia: An analysis of multi-temporal remote sensing data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 5(2), 15.
28. Reis, S. (2008). Analyzing land use/land cover changes using remote sensing and GIS in Rize, North-East Turkey. *Sensors*, 8(11), 6188–6202. <https://doi.org/10.3390/s8116188>
29. Robert, P., & Janine, B. (2017). Land changes in Slovakia: Past processes and future directions. *Applied Geography*, 85, 163–175.
30. Saha, A. K., & Agrawal, S. (2020). Mapping and assessment of flood risk in Prayagraj District, India: A GIS and remote sensing study. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 5, Article 11.
31. Seto, K. C., Parnell, S., & Elmqvist, T. (2013). A global outlook on urbanization. *Urbanization, biodiversity and ecosystem services: challenges and opportunities: a global assessment*, 1-12.

32. Shahfahada, Talukdar, S., Naikoo, M. W., Rahman, A., Gagnon, A. S., Towfiqul Islam, A. R. M., & Mosavi, A. (2023). Comparative evaluation of operational land imager sensor on board Landsat 8 and Landsat 9 for land use land cover mapping over a heterogeneous landscape. *Geocarto International*, 38, Article ID: 2152496.
33. Shi, D., & Yang, X. (2015). Support vector machines for land cover mapping from remote sensor imagery. In J. Li & X. Yang (Eds.), *Monitoring and modeling of global changes: A geomatics perspective* (pp. 265–279). Springer.
34. Singh, R. K., Sinha, V. S. P., & Joshi, P. K. (2021). A multinomial logistic model-based land use and land cover classification for the South Asian Association for Regional Cooperation nations using moderate resolution imaging spectroradiometer product. *Environment, Development and Sustainability*, 23(5), 6106–6127. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00858-y>
35. Solaimani, K., Arekhi, S., Tamartash, R., & Miryaghobzadeh, M. (2010). Land use/cover change detection based on remote sensing data: A case study of Neka Basin. *Agriculture and Biology Journal of North America*, 1(6), 1148–1157.
36. Taha, L. E. D. (2016). Classifier ensemble for improving land cover classification. *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*, 10.
37. Tewabe, D., & Fentahun, T. (2020). Assessing land use and land cover change detection using remote sensing in the Lake Tana Basin, Northwest Ethiopia. *Cogent Environmental Science*, 6, Article ID: 1778998.
38. Velastegui-Montoya, A., Montalván-Burbano, N., Carrión-Mero, P., Rivera-Torres, H., Sadeck, L., & Adami, M. (2023). Google Earth Engine: a global analysis and future trends. *Remote Sensing*, 15(14), 3675.
39. Vivekananda, G. N., Swathi, R., & Sujith, A. (2021). Multi-temporal image analysis for LULC classification and change detection. *European Journal of Remote Sensing*, 54(1), 189–199.
40. Weng, Q. (2012). *Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends*. *Remote Sensing of Environment*, 117, 34–49.
41. Wu, J., Li, Y., Li, N., & Shi, P. (2017). Development of an asset value map for disaster risk assessment in China by spatial disaggregation using ancillary remote sensing data. *Risk Analysis*, 38(1), 17–30.
42. Yang, H., Zhong, X., Deng, S., & Nie, S. (2022). Impact of LUCC on landscape pattern in the Yangtze River Basin during 2001–2019. *Ecological Informatics*, 69, 101631.

43. Yasir, M., Hui, S., Binghu, H., & Rahman, S. U. (2020). Coastline extraction and land use change analysis using remote sensing (RS) and geographic information system (GIS) technology—A review of the literature. *Reviews on Environmental Health*, 35(4), 453–460.
44. You, H., Tang, X., Deng, W., Song, H., Wang, Y., & Chen, J. (2022). A study on the difference of LULC classification results based on Landsat 8 and Landsat 9 data. *Sustainability*, 14(21), 13730.
45. Zhou, Q., & Jing, X. (2022). Evaluation and comparison of open and high-resolution LULC datasets for urban blue space mapping. *Remote Sensing*, 14, Article 5764.

المراجع العربية

١. إمارة منطقة الرياض، (٢٠١٦م)، مدينة الرياض، وزارة الداخلية، إمارة الرياض.
٢. الخاقاني، إبتهاال تقي حسن. ٢٠١٤. استخدام الأدلة (NDWI) (NDVI) و (NDBI) لكشف التغيرات في غطاء الأرض لمناطق مختارة من محافظة النجف للحقبة بين (٢٠٠١-٢٠٠٦) باستخدام بيانات الاستشعار عن بعد. مجلة الكوفة للفيزياء، ٦، ٢، ١٢-١٨.
٣. عبد الجواد، أ.، البلبيسي، ح. ٢٠١٩. تحليل وكشف التغيرات في أنماط الغطاء الأرضي ومقارنتها مع خارطة استعمال الأراضي في لواء الموقر باستخدام المرئيات الفضائية ونظم المعلومات الجغرافية. دراسات العلوم الإنسانية والاجتماعية، ٤٦، ٢: ٢٤٦-٢٦٦.