العددِ 20 شباط 2026
No.20 Feb.2026
المجلة العراقية للبحوث الانسانية والاجتماعية والعلمية
Iraqi Journal of Humanitarian, Social and Scientific Research
Print ISSN 2710-0952 Electronic ISSN2790-1254

دور الأتمتة الخلوية في التنبؤ المكاني لتغير الاستعمال الحضري في قضاء كركوك باستخدام نموذج CA-Markov

م.د. مؤيد سامي عبدالله القره غولي
وزارة التربية العراقية – مديرية تربية كركوك
mouyadsami@gmail.com

الملخص

يشهد العالم في العقود الأخيرة تسارعًا ملحوظًا في وتيرة التوسع الحضري، وما يرافقه من تغيرات جوهرية في أنماط استعمالات الأرض، الأمر الذي أفرز تحديات تخطيطية وبيئية متزايدة، خاصة في المدن التي تشهد نموًا حضريًا غير منظم. وفي هذا السياق، يبرز قضاء كركوك بوصفه إحدى المناطق التي تعرضت لتحولات مكانية واضحة في استعمالات الأرض خلال المدة الماضية، دون توفر أدوات كمية كافية للتنبؤ باتجاهات هذه التغيرات مستقبلًا ودعم قرارات التخطيط الحضري.

لذا تهدف هذه الدراسة إلى تحليل التغيرات المكانية لاستعمالات الأرض في قضاء كركوك والتنبؤ باتجاهات التوسع الحضري المستقبلية باستخدام نموذج الأتمتة الخلوية المقترن بسلاسل ماركوف (CA–Markov)، بالاعتماد على تقنيات الاستشعار عن بُعد ونظم المعلومات الجغرافية. وقد استُخدمت مرئيات الأقمار الصناعية من منظومة Landsat للأعوام 1990 و2015 و2025، حيث أُجريت عليها عمليات المعالجة المسبقة والتصنيف الموجّه لاستخراج خرائط استعمالات الأرض. كما استُخدمت خرائط عامي 1990 و2015 لاشتقاق مصفوفات الانتقال الاحتمالية وتطبيق النموذج للتنبؤ المكاني، مع التحقق من دقة النتائج من خلال مقارنة خريطة التنبؤ لعام 2025 مع الخريطة الفعلية باستخدام مؤشرات المطابقة الإحصائية، ثم إسقاط النموذج للتنبؤ حتى عام 2050.

أظهرت نتائج الدراسة توسعًا حضريًا متسارعًا على حساب بعض فئات استعمالات الأرض الأخرى، ولاسيّما الأراضي الزراعية، مع كفاءة جيدة لنموذج CA–Markov في محاكاة التغيرات المكانية. وتوصي الدراسة بضرورة توظيف نماذج التنبؤ المكاني في دعم التخطيط الحضري وإدارة استعمالات الأرض، بما يسهم في الحد من التوسع الحضري غير المنظم وتحقيق التنمية الحضرية المستدامة في قضاء كركوك.

الكلمات الدالة:
الأتمتة الخلوية CA–Markov، التوسع الحضري، استعمالات الأرض، التنبؤ المكاني، قضاء كركوك.

The Role of Cellular Automata in Spatial Prediction of Urban Land Use Change in Kirkuk District Using the CA–Markov Model

M.D. Moayad Sami Abdullah Al-Qara Ghouli
Iraqi Ministry of Education - Kirkuk Education Directorate
mouyadsami@gmail.com

A B S T R A C T

In recent decades, the world has witnessed a significant acceleration in the pace of urban expansion, accompanied by profound changes in land use patterns. This phenomenon has generated increasing planning and environmental challenges, particularly in cities experiencing unplanned urban growth. Within this context, Kirkuk District represents one of the areas that has undergone notable spatial transformations in land use during recent decades, while lacking sufficient quantitative tools to predict future trends and support urban planning decision-making.

Therefore, this study aims to analyze spatial changes in land use within Kirkuk District and to predict future urban expansion trends using the Cellular Automata–Markov (CA–Markov) model, supported by remote sensing and geographic information systems techniques. Multitemporal Landsat satellite imagery for the years 1990, 2015, and 2025 was employed, followed by preprocessing and supervised classification to produce land use maps. Land use maps from 1990 and 2015 were used to derive transition probability matrices and implement the CA–Markov model for spatial prediction. Model accuracy was assessed by comparing the predicted land use map for 2025 with the actual map using statistical agreement indices, after which the model was applied to forecast land use changes up to 2050.

The results revealed a rapid increase in urban land use at the expense of other land use categories, particularly agricultural land, while demonstrating good performance of the CA–Markov model in simulating spatial land use changes. The study recommends the adoption of spatial prediction models to support urban planning and land management processes, contributing to the mitigation of unplanned urban expansion and the achievement of sustainable urban development in Kirkuk District..

Key words:
Cellular Automata, CA–Markov Model, Urban Expansion, Land Use, Spatial Prediction, Kirkuk District.

المقدمـــــــــــة.

تُعدّ التغيرات في استعمالات الأرض، ولاسيّما الحضرية منها، من أبرز الظواهر المكانية التي رافقت التحولات الديموغرافية والاقتصادية خلال العقود الأخيرة، إذ أسهم النمو السكاني المتسارع وتزايد الأنشطة الاقتصادية والخدمية في إعادة تشكيل البنية المكانية للمدن والمناطق الحضرية المحيطة بها، مما أدى في كثير من الحالات إلى تقلص الأراضي الزراعية وتزايد الضغوط البيئية والتخطيطية وقد جعلت هذه التحولات من دراسة تغير استعمالات الأرض والتنبؤ باتجاهاتها المستقبلية محورًا أساسياً في بحوث التخطيط الحضري والتنمية المستدامة (Liu et al., 2017, p784).

وقد أسهمت تقنيات الاستشعار عن بُعد ونظم المعلومات الجغرافية في إحداث نقلة نوعية في رصد التغيرات المكانية وتحليلها، بفضل ما توفره من بيانات متعددة الأزمنة ذات تغطية مكانية واسعة ودقة مناسبة للتحليل الحضري، ورغم أهمية تحليل التغيرات الماضية، إلا أن الاعتماد على التحليل الوصفي وحده لم يعد كافيًا لتلبية متطلبات التخطيط الحضري المعاصر، الذي يستوجب أدوات قادرة على التنبؤ المكاني واستشراف أنماط التوسع الحضري المستقبلية (المطير والرقيب، 2023، ص38). وفي هذا الإطار، برزت نماذج التغير الأرضي بوصفها أدوات كمية فعالة، ويُعد نموذج سلاسل ماركوف من أكثر النماذج استخدامًا في تقدير احتمالات الانتقال بين فئات استعمالات الأرض عبر الزمن، غير أن محدوديته تكمن في عدم قدرته على تمثيل البعد المكاني للتغير (الأسمري والجخيدب، 2024، ص96).

وقد أدى دمج سلاسل ماركوف مع نموذج الأتمتة الخلوية إلى تجاوز هذا القصور، حيث يتيح نموذج CA–Markov محاكاة التغيرات المكانية من خلال دمج البعد الزماني مع البعد، الأمر الذي جعله من أكثر النماذج استخدامًا في التنبؤ بتغير استعمالات الأرض والتوسع الحضري في بيئات حضرية مختلفة (Eastman, 2012, p235).

وانطلاقًا من ذلك، تهدف هذه الدراسة إلى توظيف نموذج الأتمتة الخلوية المقترن بسلاسل ماركوف (CA–Markov) لتحليل التغيرات المكانية لاستعمالات الأرض في قضاء كركوك والتنبؤ باتجاهات التوسع الحضري المستقبلية حتى عام 2050، بالاعتماد على مرئيات Landsat متعددة الأزمنة، مع التحقق من كفاءة النموذج باستخدام مؤشرات المطابقة الإحصائية، وبذلك تسهم الدراسة في تقديم أساس كمي مكاني يدعم التخطيط الحضري وإدارة الأرض ضمن منطقة الدراسة، ويعزز توظيف أدوات النمذجة المكانية في الدراسات الحضرية العراقية.

مشكلة البحث.

شهد قضاء كركوك خلال العقود الأخيرة توسعًا حضريًا متسارعًا ناتجًا عن النمو السكاني، والتغيرات الوظيفية لاستعمالات الأرض، مما أدى إلى ضغط متزايد على الأراضي الزراعية والمناطق المفتوحة، وأحدث اختلالات مكانية في نمط توزيع الاستعمالات الأرض. وعلى الرغم من توفر دراسات تصف التغيرات الحاصلة في استعمالات الأرض، إلا أن معظمها يقتصر على التحليل الوصفي للتغيرات الماضية، دون التعمق في التنبؤ المكاني المستقبلي لهذه التغيرات باستخدام نماذج كمية قادرة على محاكاة الواقع المكاني بدقة.ومن هنا تتحدد مشكلة الدراسة في غياب نماذج تنبؤ مكانية دقيقة يمكن الاعتماد عليها في استشراف اتجاهات التوسع الحضري المستقبلية في قضاء كركوك، ودعم قرارات التخطيط الحضري المستدام؟

فرضية البحث.

من المشكلة السابقة تنطلق الدراسة من فرضية رئيسة مفادها أن نموذج الأتمتة الخلوية المقترن بسلاسل ماركوف (CA–Markov) يمتلك قدرة عالية على محاكاة التغيرات المكانية لاستعمالات الأرض، ويمكنه التنبؤ باتجاهات التوسع الحضري المستقبلية في قضاء كركوك بدرجة دقة مقبولة علميًا، عند توظيفه بالاعتماد على مرئيات الأقمار الصناعية ونظم المعلومات الجغرافية.

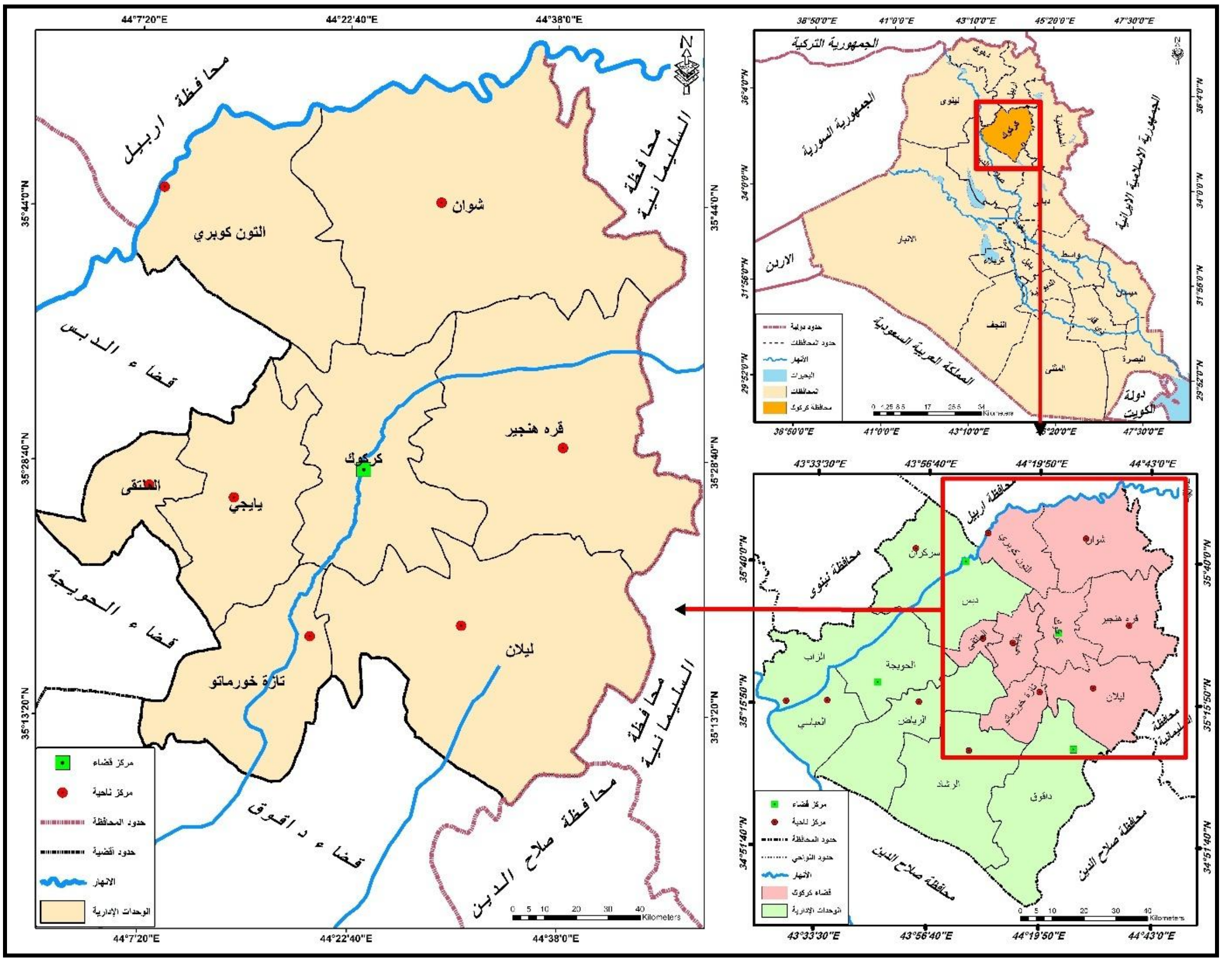
أهمية البحث.

تنبع الأهمية العلمية للبحث من عدة جوانب علمية وتطبيقية، من أبرزها، أنها تسهم في تطوير أدوات التنبؤ المكاني بتغير استعمالات الأرض، ولاسيما الاستعمال الحضري، باستخدام نماذج كمية حديثة، فضلاً عن أنها توفّر قاعدة علمية لدعم اتخاذ القرار التخطيطي في قضاء كركوك، من خلال استشراف اتجاهات التوسع الحضري المستقبلية. من خلال إبراز دور الاستشعار عن بُعد ونظم المعلومات الجغرافية في تحليل التغيرات المكانية طويلة الأمد التي تساعد الجهات المعنية على وضع سياسات إدارة أرض مستدامة تحدّ من الزحف الحضري غير المنظم.

موقع منطقة للدراسة.

تمثلت الحدود المكانية للدراسة بقضاء كركوك التابع لمحافظة كركوك الذي يمثل مركزها الإداري، حيث يقع في الشمال الشرق منها. يحده من الشمال والشمال الغربي محافظة أربيل، ومن الشرق محافظة السليمانية ومن الجنوب الشرقي محافظة صلاح الدين، في حين يحد منطقة الدراسة من الجنوب والجنوب الغربي قضاء داقوق والحويجة التابعان للمحافظة، أما من الغرب فيحده قضاء الدبس التابعة للمحافظة نفسها، إذ يعد القضاء أكبر وحده إدارية فيها من حيث الحجم السكاني والبالغ نحو(1,549,454) نسمة، يتوزعون على مساحة بلغت حوالي (3712.9) كم^2، موزعين على (8) نواحي(وزارة التخطيط العراقية، 2024)، هذا وتقع منطقة الدراسة فلكياً بين دائرتي عرض '13 °35 (''0 '44 °35 - ''20 شمالاً، وخطي طول (''0 '38 °44 - ''20 '7 °44) شرقاً. خريطة (1).

خريطة (1) موقع منطقة الدراسة بالنسبة للعراق ومحافظة كركوك



المصدر: الهيأة العامة للمساحة، خريطة العراق الإدارية، مقياس 1/100000. خريطة محافظة كركوك، مقياس 1/250000، خريطة الوحدات الإدارية لقضاء كركوك لعام 2024، ومخرجات برنامج (Arc Gis 10,8).

أهداف البحث.

يهدف هذا البحث إلى تحقيق مجموعة من الأهداف العلمية والتطبيقية، تتمثل فيما يأتي: -

1- تحليل التغيرات المكانية لاستعمالات الأرض في قضاء كركوك خلال المدة (1990–2015).
2- بناء نموذج تنبؤ مكاني لتغير الاستعمال الحضري باستخدام نموذج (CA–Markov).
3- تقييم دقة النموذج من خلال مقارنة خريطة التنبؤ لعام 2025 مع الخريطة الفعلية للسنة نفسها.
4- استشراف اتجاهات التغير المستقبلي لاستعمالات الأرض، ولاسيما الاستعمال الحضري، حتى عام 2050.
5- إبراز دور الأتمتة الخلوية في دعم التخطيط الحضري المستقبلي.

منــــــــاهج البحث.

اعتمد البحث على تكامل عدة مناهج علمية من أجل تحقيق أهدافه، فقد اعتمدت الدراسة على منهجية متكاملة تجمع بين المنهج الوصفي التحليلي والمنهج الكمي المكاني، وذلك من خلال استخدام تقنيات الاستشعار عن بُعد ونظم المعلومات الجغرافية، بهدف دراسة التغيرات المكانية لاستعمالات الأرض والتنبؤ باتجاهات التوسع الحضري في قضاء كركوك.

الخطوات العملية للدارسة.

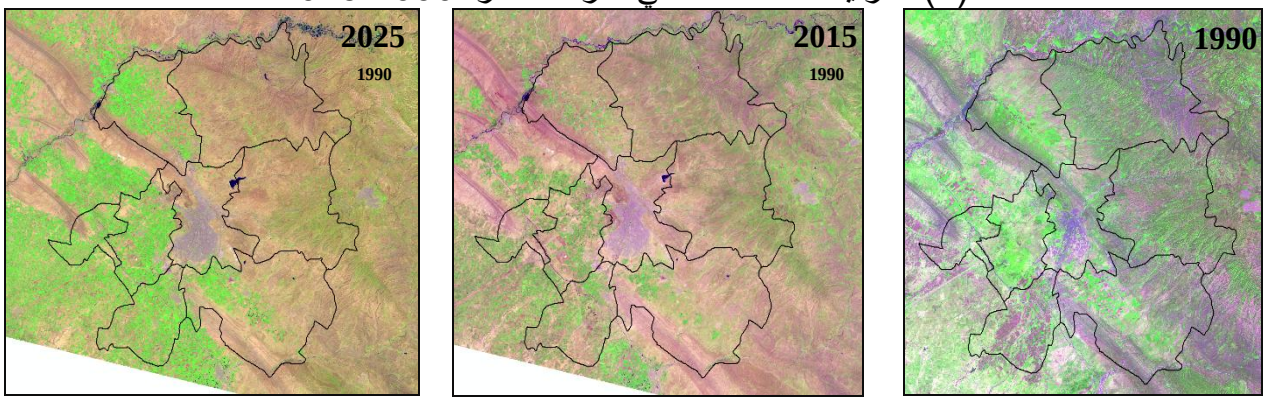
1- مصادر البيانات وبناء قاعدة البيانات الجغرافية.

قبل الشروع في تطبيق نماذج التنبؤ المكاني لتغير الاستعمال الحضري في قضاء كركوك، كان من الضروري وضع إطار منهجي واضح يحدد الأسس العلمية لاختيار البيانات الفضائية وآلية توظيفها ضمن نموذج ماركوف والأتمتة الخلوية (CA-Markov). وانطلاقاً من ذلك، جرى اعتماد عام 1990 كسنة أساس تمثل الوضع المكاني المرجعي للاستعمالات الأرضية، في حين اختير عام 2015 كسنة مقارنة لاحتساب احتمالات الانتقال بين أصناف الاستعمالات، تمهيداً لإجراء عمليات التنبؤ المكاني المستقبلية. إذ اعتمدت الدراسة على مرئيات الأقمار الصناعية من منظومة (Landsat)، ولاسيما (Landsat 4 وLandsat 8) لما توفره هذه المرئيات من استمرارية زمنية طويلة ودقة مكانية ملائمة للتحليل المكاني، فضلاً عن إتاحتها المجانية عبر الأرشيف المفتوح، الأمر الذي يتيح تتبع التحولات المكانية للاستعمال الحضري على مدى زمني ممتد وبدرجة عالية من الموثوقية.

إذ تم اختيار مرئيات شهر آذار (مارس) لكل من سنتي (1990 و2015)، لما يتميز به هذا الشهر من استقرار نسبي في الظروف المناخية والغطاء النباتي، مما يقلل من تأثير العوامل الموسمية على نتائج التصنيف ويعزز من دقة المقارنة الزمنية بين الفترتين. وبعد إنجاز عمليات التصنيف الأرضي لكلتا السنتين، استُخدمت نتائج عامي (1990 و2015) لبناء مصفوفات الانتقال الاحتمالية وتطبيق نموذج (CA-Markov) للتنبؤ بأنماط الاستعمال الحضري لعام (2025).

وفي خطوة لاحقة، جرى تصنيف مرئية عام (2025) الفعلية ومقارنتها مع خريطة التنبؤ للعام نفسه المستخلصة من النموذج، وذلك بهدف تقييم دقة النموذج وقياس قدرته على محاكاة الواقع المكاني باستخدام مؤشرات التحقق الإحصائي والدقة المكانية. وبناءً على نتائج هذا التقييم، أُعيد توظيف النموذج نفسه للتنبؤ باتجاهات التغير المستقبلي للاستعمال الحضري حتى عام (2050)، بما يتيح استشراف المسارات المكانية المحتملة للتوسع الحضري وانعكاساته على استعمالات الأرض الأخرى في قضاء كركوك(الأسمري والجخيدب، 2024، ص97)، كما موضح في الشكل (1).

شكل (1) المرئيات المستخدمة في الدراسة للفترة 1990-2025



المصدر: اعتماداً على مرئيات (Landsat 4 وLandsat 8)، باستخدام برنامج (Arc GIS V 10.8).

2. تحليل استعمالات الأرض والتغيرات المكانية.

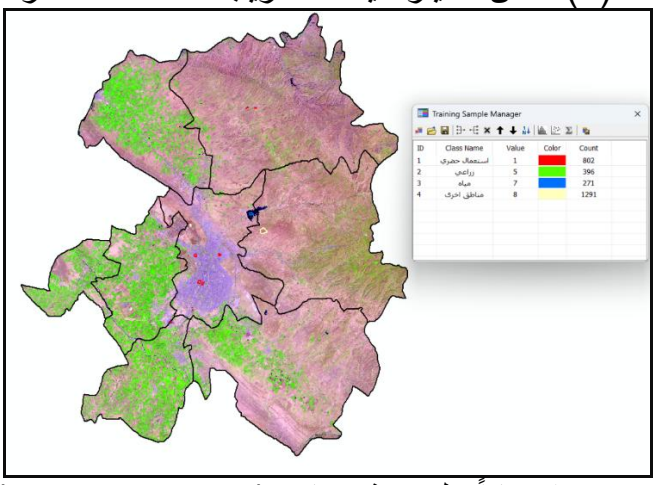
تعتمد آلية الحصول على استعمالات الارض باستخدام التصنيف الموجه على تحليل الصور الفضائية من خلال تدريب خوارزمية التصنيف باستخدام عينات معروفة مسبقًا. في البداية، يتم جمع الصور الفضائية من مصادر موثوقة مثل أقمار (Landsat)، حيث يتم اختيار نطاقات طيفية مناسبة تساعد في التمييز بين أنواع استعمالات الارض المختلفة. بعد ذلك، تُجرى عمليات تصحيح هندسي وإشعاعي على الصور للتأكد من دقتها، وإزالة أي تشوهات ناتجة عن العوامل الجوية أو انحرافات القمر الصناعي (محمد، 2025، ص220).

بعد تجهيز الصور، يتم اختيار مناطق تدريب تمثل الفئات المستهدفة، مثل الغابات، الأراضي الزراعية، المناطق الحضرية، والمسطحات المائية. يتم تحديد هذه المناطق استنادًا إلى مصادر مرجعية مثل الصور الجوية أو البيانات الميدانية، ثم تُستخدم كعينات تدريبية لتعليم الخوارزمية كيفية التمييز بين الفئات المختلفة. بمجرد إعداد بيانات التدريب، يتم تطبيق خوارزمية تصنيف موجه مثل أقصى احتمالية (MLC) أو شبكات الدعم الشعاعية (SVM)، والتي تقوم بتحليل كل بكسل في الصورة وتحديد الفئة التي ينتمي إليها بناءً على الخصائص الطيفية (الطائي والعزاوي، 2013، ص210). وعلى ضوء ما تقدم فإنَّ عملية التصنيف الموجّه تتم على مرحلتين أساسيتين هما: -

1-2. مرحلة اختيار مناطق التدريب.

يتم اختيار مناطق التدريب (Training) من خلال استخدام المرئية الفضائية الملونة بألوان كاذبة، ومن خلال الاطلاع على بيانات المرجعية فضلاً المعلومات المستنبطة من الزيارات الميدانية الى منطقة الدراسة والاستعانة بجهاز تحديد المواقع العالمي (GPS) والعلم المسبق بتصانيف الترب في منطقة الدراسة، ثم تبدأ عملية اختيار مناطق التدريب وفقاً للتباينات في الانعكاسية الأرضية لتلك المناطق (الامارة، 2021، ص127-128). وتم اختيار مناطق التدريب في الشكل (2).

شكل (2) أماكن اختيار عينات التدريب لاستعمالات الارض



المصدر: اعتماداً على بيئة برنامج (Arc GIS V 10.8).

ولفهم منطقة الدراسة بدقة، يجب إجراء زيارات ميدانية وتحليل الصور الفضائية لتحديد المواقع الأكثر تمثيلًا للأهداف المستهدفة، مع تجنب المناطق القريبة من الحدود الفاصلة بين الأنماط المختلفة، وذلك لتفادي الخلايا الصورية التي قد تعاني من تداخل بين الفئات. عند اختيار مناطق التدريب، يفضل أن تكون مساحتها صغيرة للغاية لضمان دقة التحديد، حيث إن تصغير المساحة يعزز الدقة الطيفية والانعكاسية للهدف. كما يجب أن تكون مناطق التدريب ذات انعكاسية واضحة ومميزة مقارنة بالمناطق المحيطة بها، مما يستدعي دقة متناهية في تحديد خصائص الانعكاس الطيفي لكل فئة عند اختيار المواقع التدريبية. ولضمان تمثيل المرئية الفضائية بالكامل، يُفضل زيادة عدد المواقع المخصصة لكل نوع، مما يساعد في تحسين عمليات التداخل والتدرج بين الفئات المختلفة. بالإضافة إلى ذلك، لا ينبغي إهمال أي صنف طيفي عند تحليل المرئية الفضائية، لأن ذلك قد يؤدي إلى زيادة غير مرغوبة في عدد الأصناف التي يتم تفسيرها عند تنفيذ عملية التصنيف بواسطة الحاسوب (عبد القادر، 2010، ص53).

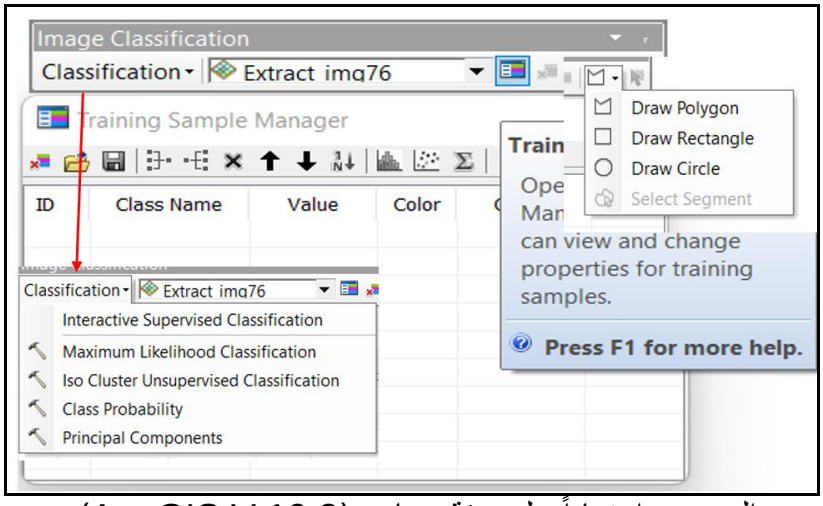
2-2. مرحلة التصنيف.

في هذه المرحلة، يتم اختيار إحدى الطرق الإحصائية لتنفيذ عملية التصنيف الآلي، حيث تُجرى مقارنة بين الوحدات الصورية غ ير المصنفة وتلك الخاصة بمناطق التدريب لتحديد مدى التشابه والتقارب

بينها. تتوفر عدة أساليب حسابية لإنجاز التصنيف الآلي، ومن بين هذه الأساليب تم اعتماد طريقة التصنيف بالبصمة الطيفية، التي تعتمد على القيم الانعكاسية لأنواع استعمالات الارض المختلفة، والتي تتفاوت فيما بينها تبعًا للخصائص الطيفية لكل عنصر. يعتمد نجاح هذه الطريقة على نوع المتحسس المستخدم والقدرة التمييزية للقمر الصناعي، حيث قد تكون بعض الأجسام صغيرة جدًا مقارنة بقدرة التمييز الخاصة بالمتحسس، مما يؤدي إلى حدوث تداخل بين القيم الانعكاسية للأغطية الأرضية المختلفة.

في هذه الدراسة، تم الاستعانة ببيانات القمر الصناعي (Landsat)، الذي يتميز بقدرة تمييزية تبلغ 30 مترًا، وذلك باستخدام برنامج (ArcGIS). توفر الإصدارات الحديثة من برمجيات نظم المعلومات الجغرافية مجموعة واسعة من الأدوات المتخصصة في معالجة وتحليل المرئيات الفضائية، ومن أبرزها أدوات التصنيف. تمتاز هذه الأدوات بإمكانية التعديل والتحديث المستمر، حيث يمكن تصحيح أي خطأ في اختيار عينات التدريب بسهولة عبر حذفها أو دمج عدة عينات ضمن فئة واحدة. فعلى سبيل المثال، عند تصنيف المسطحات المائية، يمكن اختيار أكثر من عينة تدريبية لتعزيز دقة التصنيف، وهي ميزة لا تتوفر في بعض البرمجيات الأخرى مثلاً (ERDAS Imagine). كما يحتوي امتداد التصنيف في (ArcGIS) على مجموعة من الخيارات المتقدمة، مثل إدارة عينات التدريب ورسم مناطق التصنيف بأشكال هندسية متنوعة، مما يتيح مرونة ودقة أكبر في عملية التصنيف. وكما في الشكل (3).

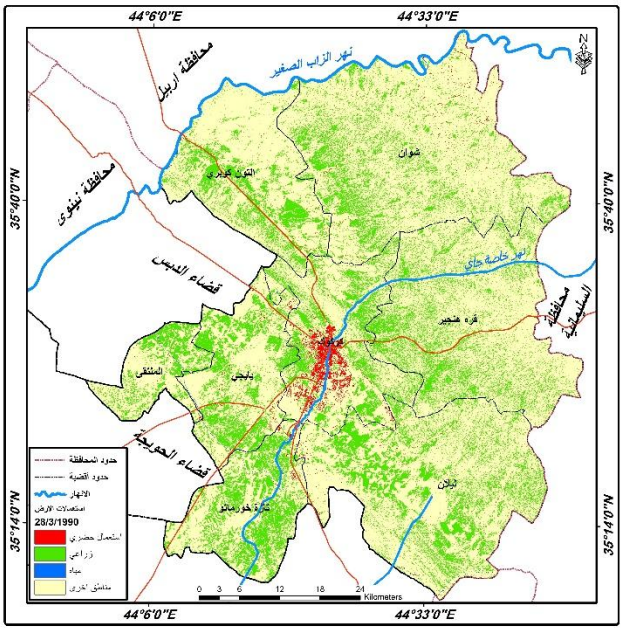
شكل (3) امتداد أدوات التصنيف في برنامج ARC GIS



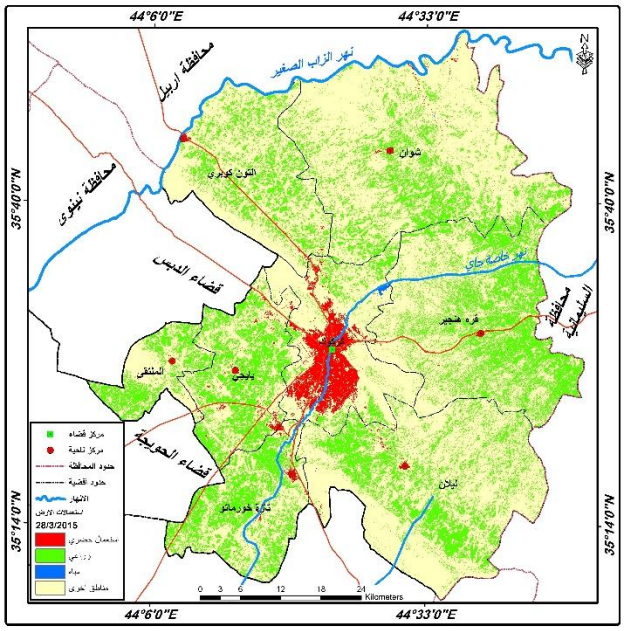
المصدر: اعتماداً على بيئة برنامج (Arc GIS V 10.8).

وعند تطبيق التصنيف للمرئيات الثلاث تم استخراج النتائج في الخرائط(2، 3، 4) والجدول (1).

خريطة (2) استخدامات الارض لعام 1990 خريطة (3) استخدامات الارض لعام 2015

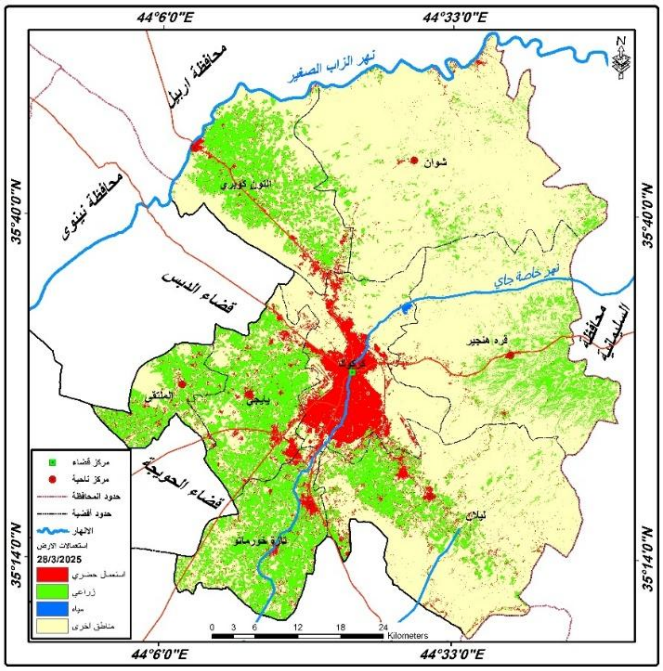


المصدر:- اعتماداً على: (Landsat 5)، ذي المتحسس TM.



المصدر:- اعتماداً على: (Landsat 8)، ذي المتحسس OLI.

خريطة (4) استخدامات الارض لعام 2025



المصدر:- اعتماداً على: (Landsat 8)، ذي المتحسس OLI.

ويلاحظ من الخرائط (2، 3، 4) أعلاه والجدول (1) الحقائق الاتية:

تُظهر نتائج الخرائط والجدول تصاعداً واضحاً ومتسارعاً في الاستعمال الحضري ضمن قضاء كركوك خلال المدة (1990–2025)، إذ ارتفعت مساحته من (41.4 كم²) وبنسبة (1.1%) عام (1990) إلى (108.4 كم²) وبنسبة (2.9%) عام (2015)، ثم قفزت بشكل كبير لتبلغ (285.0 كم²) وبنسبة (7.7%) عام (2025). ويعكس ذلك زيادة صافية في المساحة الحضرية مقدارها (243.6 كم²) خلال مدة الدراسة، وهو ما يشير إلى تحوّل جذري في البنية المكانية للاستعمالات الأرضية لصالح التوسع الحضري.

جدول (1) مساحة استعمالات الارض للأعوام (1990، 2015، 2025) في قضاء كركوك

ت	الصنف	1990		2015		2025		مساحة التغير/كم2
		المساحة/كم2	النسبة%	المساحة/كم2	النسبة%	المساحة/كم2	النسبة%	
1	استعمال حضري	41.4	1.1	108.4	2.9	285	7.7	243.6
2	استعمال زراعي	870	23.4	1032.6	27.8	817.5	22	-52.5
4	مياه	3.4	0.1	1.8	0	1.4	0	-2
5	مناطق اخرى	2797.8	75.4	2569.9	69.2	2608.7	70.3	-189.1
6	المجموع	3712.6	100	3712.6	100	3712.6	100	-

المصدر: اعتماداً على مرئيات (Landsat 5 وLandsat 8)، ومخرجات برنامج (Arc GIS V 10.8).

كما يلحظ أن مرحلة ما بعد عام (2015) تمثل المرحلة الأكثر تسارعاً في النمو الحضري، حيث تضاعفت المساحة الحضرية أكثر من مرتين مقارنة بعام (2015)، الأمر الذي يتوافق مع ما تُظهره الخرائط من تمدد حضري كثيف ومترابط انطلاقاً من نواة مدينة كركوك باتجاه المحاور الرئيسة للطرق، ولاسيما المحورين الشمالي والجنوبي، إضافة إلى الامتدادات الخطية بمحاذاة المجاري المائية وشبكات النقل. ويشير هذا التوسع الحضري إلى أن النمو لم يكن نمواً داخلياً مدمجاً فقط، بل اتخذ طابع الزحف العمراني الأفقي، إذ توسعت البقع الحضرية على حساب الاستعمالات الزراعية والمناطق الأخرى المحيطة بالمدينة، وهو ما تؤكده خرائط عام (2025) التي تُظهر اندماج عدد من البقع الحضرية المتناثرة ضمن نسيج حضري شبه متصل. في المقابل، سجل الاستعمال الزراعي تراجعاً ملحوظاً في نهاية مدة الدراسة، إذ انخفضت مساحته من (1032.6 كم²) عام (2015) إلى (817.5 كم²) عام (2025)، أي بخسارة مقدارها (52.5 كم²) مقارنة بعام (1990). ويعكس هذا التراجع الأثر المباشر للتوسع الحضري على الأراضي الزراعية القريبة من مركز المدينة، ولاسيما تلك الواقعة ضمن السهل الفيضي والمناطق ذات القابلية العالية للبناء.

أما المسطحات المائية فقد شهدت تغيراً محدوداً من حيث المساحة، إذ تراجعت من (3.4 كم²) عام (1990) إلى (1.4 كم²) عام (2025)، وهو تغير طفيف كمياً، إلا أنه يحمل دلالات بيئية مرتبطة بالضغوط البشرية والتغيرات الهيدرولوجية. وسجلت المناطق الأخرى انخفاضاً صافياً قدره (189.1 كم²) خلال مدة الدراسة، نتيجة تحويل أجزاء واسعة منها إلى استعمالات حضرية وزراعية، ولاسيما في المناطق القريبة من شبكة الطرق الرئيسة وحواف المدينة.

وبشكل عام، تؤكد نتائج الجدول والخرائط أن الاستعمال الحضري هو الصنف الأكثر ديناميكية وتأثيراً في إعادة تشكيل المشهد المكاني لقضاء كركوك، وأن اتجاهات التغير المساحي تسير نحو تعزيز الطابع الحضري على حساب الاستعمالات الأخرى، وهو ما يبرر اعتماد نموذج الأتمتة الخلوية–ماركوف (CA-Markov) في استشراف المسارات المستقبلية للتوسع الحضري حتى عام (2050)، مع ضرورة تفسير هذه النتائج ضمن إطار تخطيطي يأخذ بنظر الاعتبار الضغوط البيئية والزراعية المصاحبة لهذا التوسع.

3- التنبؤ بتغير استعمالات الارض باستخدام انموذج(CA_ MARKOV).

يُعدّ استخدام الأرض أحد المكونات المكانية الرئيسة في البيئة الحضرية، إذ يعكس بصورة مباشرة طبيعة التفاعل الدينامي بين العوامل الطبيعية من جهة، والأنشطة البشرية ولاسيّما العمرانية منها

من جهة أخرى. ومع تسارع معدلات التوسع الحضري وتزايد الضغوط السكانية والاقتصادية، أصبحت دراسة التحولات المستقبلية في استخدامات الأرض، وبخاصة الاستعمال الحضري، ضرورة علمية وتخطيطية تهدف إلى دعم كفاءة التخطيط المكاني وتحقيق الإدارة المستدامة للأراضي والموارد. ولم يعد الاعتماد على التحليل الوصفي للتغيرات السابقة كافياً، بل بات من الضروري توظيف نماذج تنبؤية قادرة على استشراف الاتجاهات المستقبلية للتوسع الحضري ضمن إطار مكاني وزماني متكامل (Mondal, M. S. et al, 2020, p715).

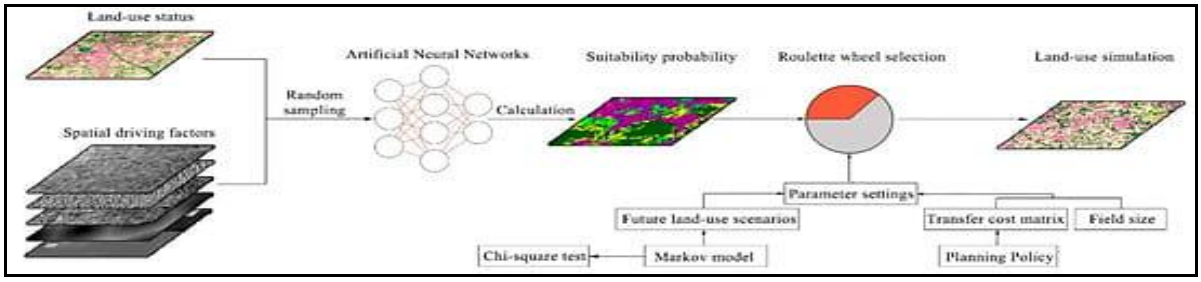
ويُعد نموذج الأتمتة الخلوية المقترنة بسلاسل ماركوف (CA-Markov) من النماذج المتقدمة في مجال نمذجة تغير استخدامات الأرض، إذ يجمع بين البعد الاحتمالي والبعد المكاني في تحليل التحولات الحضرية. إذ تتولى سلاسل ماركوف احتساب احتمالات الانتقال بين أصناف استخدامات الأرض المختلفة استناداً إلى السجل التاريخي للتغيرات، في حين تسهم الأتمتة الخلوية في محاكاة الامتداد المكاني للتوسع الحضري من خلال مراعاة تأثير الجوار المكاني للخلايا الشبكية، وهو ما يعكس الطبيعة المترابطة للنمو الحضري واتجاهاته المكانية (Chen, X. et al, 2022, p4).

وتزداد كفاءة هذا النموذج عند دمجه مع الشبكات العصبية الاصطناعية (Neural Networks)، التي تمتلك قدرة عالية على تحليل العلاقات المعقدة وغير الخطية بين المتغيرات المؤثرة في التوسع الحضري، مثل القرب من شبكة الطرق، ومراكز النشاط الحضري، والخصائص الطبوغرافية، وأنماط الاستخدام السابقة. إذ تتيح هذه الشبكات للنموذج التعلم من الأنماط المكانية التاريخية، وتحسين تقدير احتمالات التحول الحضري بما يتجاوز الأساليب الخطية التقليدية.

وتبدأ عملية التنبؤ بجمع وتصنيف بيانات استخدامات الأرض للفترات الزمنية السابقة، وتحليل الاتجاهات العامة للتغير الحضري، ولاسيّما تحولات الأراضي الزراعية والمناطق المفتوحة إلى استعمالات حضرية. بعد ذلك، يتم تدريب الشبكة العصبية على هذه البيانات لاستخلاص العلاقات المكانية بين العوامل المؤثرة، في حين تُستخدم مصفوفات الانتقال المشتقة من سلاسل ماركوف لتحديد احتمالات التحول بين أصناف الاستخدامات. ويقوم نموذج الأتمتة الخلوية بمحاكاة هذه التحولات مكانياً ضمن بيئة خلوية، بما يسمح بإنتاج خرائط تنبؤية توضح أنماط التوسع الحضري المستقبلية واتجاهاته المحتملة (عجرمة وشكري، 2022، ص104).

وتكمن أهمية توظيف هذا النموذج في قدرته على تقديم تنبؤات مكانية دقيقة نسبياً للتغيرات الحضرية المستقبلية، اعتماداً على السلوك التاريخي لاستخدامات الأرض والتفاعلات المكانية المصاحبة له. كما يوفر أداة علمية داعمة لصنّاع القرار والمخططين الحضريين في تقييم سيناريوهات التوسع الحضري المستقبلية، والحد من الزحف العمراني غير المنظم، والحفاظ على الأراضي الزراعية، وتقليل الآثار البيئية السلبية المصاحبة للنمو الحضري غير المخطط، وكما في الشكل (4).

شكل (4) المخطط الهيكلي لفكرة التنبؤ بتغير الاستعمال الحضري.



Chen, X.; He, X.;Wang, S,(2022) Simulated Validation and Prediction of Land Use under Multiple Scenarios in Daxing District, Beijing, China,

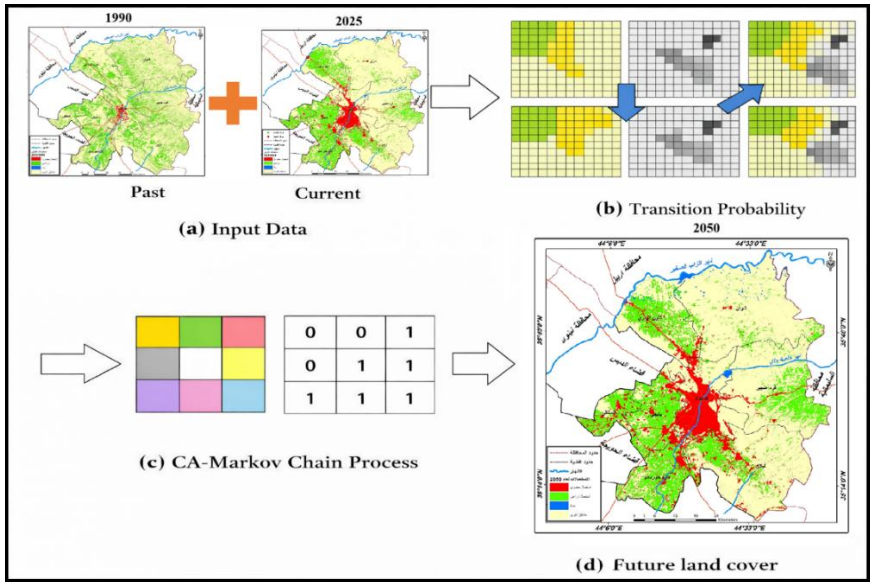
Based on GeoSOS-FLUS Model, Sustainability, 14(18), p4. https://doi.org/10.3390/su141811428.

1-3. اليه اشتقاق الأتمتة الخلوية في برنامج Idrisi

اعتمدت هذه الدراسة على اشتقاق نموذج الأتمتة الخلوية المقترنة بسلاسل ماركوف (CA-Markov) ضمن بيئة برنامج Idrisi، بوصفه أحد النماذج المتقدمة في محاكاة التغيرات المكانية لاستخدامات الأرض، ولاسيّما الاستعمال الحضري وذلك من خلال ما يلي: -

- استندت عملية النمذجة إلى اختيار فترتين زمنيتين تمثلان الأساس التحليلي للنموذج، حيث جرى اعتماد عام (1990) كسنة أساس تمثل أقدم حالة مكانية لاستخدامات الأرض ضمن منطقة الدراسة، ومقارنتها مع عام (2025) بوصفه سنة مرجعية حديثة تعكس التحولات الحضرية المتسارعة. تمثّل هذه المقارنة الأساس الرياضي لاشتقاق مصفوفات الانتقال التي تعبر عن احتمالات التحول بين أصناف استخدامات الأرض المختلفة، اعتماداً على السلوك التاريخي للتغير المكاني. وتقوم سلاسل ماركوف، وفق المعادلات التي اقترحها العالم ماركوف وطُورت لاحقاً ضمن التطبيقات الجغرافية، باحتساب هذه الاحتمالات دون افتراض اتجاهات مسبقة للتغير، وإنما استناداً إلى العلاقات الإحصائية المستخلصة من بيانات الفترتين الزمنيتين. وفي المرحلة اللاحقة، يُدمج هذا البعد الاحتمالي مع الأتمتة الخلوية التي تضيف البعد المكاني للنموذج، من خلال محاكاة تأثير الجوار المكاني للخلايا الشبكية في توجيه التوسع الحضري، بما يعكس الطبيعة التراكمية والانتشارية للنمو العمراني. إذ يُفترض أن احتمالية تحوّل الخلية إلى استعمال حضري تزداد كلما اقتربت من خلايا حضرية قائمة، وهو ما يحاكي الواقع المكاني للتوسع الحضري. وبعد استكمال بناء النموذج اعتماداً على بيانات عامي (1990) و (2025)، جرى استخدام مخرجات النموذج لإجراء عملية التنبؤ المكاني بعيد المدى حتى عام (2050)، من خلال محاكاة سيناريوهات التغير المستقبلية لاستخدامات الأرض، وبخاصة الاستعمال الحضري. وتعتمد لغة عمل هذا النموذج على خوارزمية رياضية متكاملة تجمع بين مصفوفات الانتقال الاحتمالية وقواعد الجوار المكاني، كما في الشكل (5).

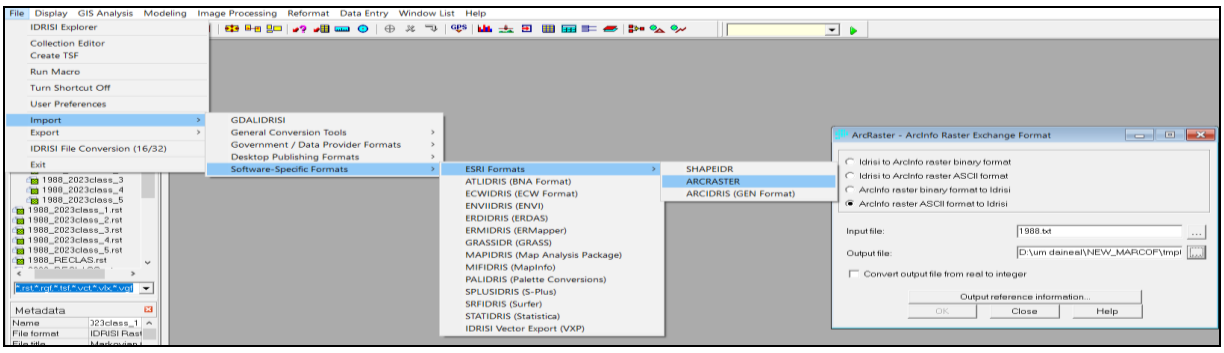
شكل (5) فكرة معالجة المرئيات الفضائية للتنبؤ المستقبلي وفق انموذج ماركوف.

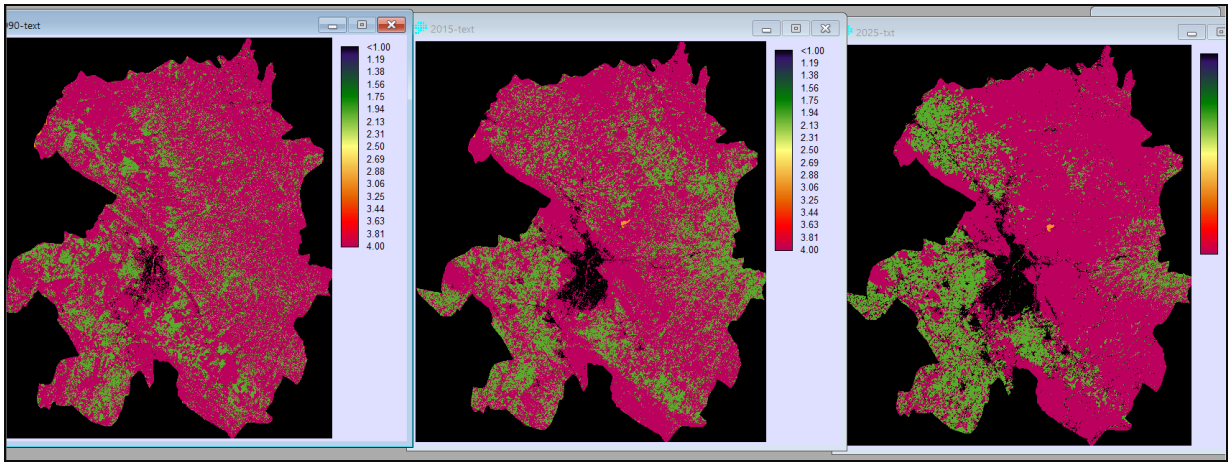


تنظيم الباحث اعتماداً على:- (Eastman, J. R, 2012, p275).

- بعد إنجاز عمليات المعالجة الرقمية للمرئيات الفضائية، جرى تصنيف استخدامات الأرض باستخدام برنامج ArcGIS وفق منهجية موحدة تضمن دقة النتائج وقابليتها للتكامل مع نماذج التنبؤ المكاني. وقد تم تنفيذ عملية التصنيف لكل سنة زمنية على حدة، بما يسمح برصد التحولات المكانية في أنماط استخدامات الأرض، ولاسيّما التغيرات المرتبطة بالاستعمال الحضري، عبر الفترات الزمنية المختلفة. وفي مرحلة لاحقة، أُجريت عملية إعادة التصنيف (Reclassification) لكل سنة بشكل مستقل، بهدف توحيد فئات استخدامات الأرض، وضبط التباينات التصنيفية، ومعالجة الأخطاء المحتملة التي قد تؤثر في نتائج التحليل المكاني أو في دقة النمذجة اللاحقة. وتسهم هذه الخطوة في تحقيق التجانس بين الطبقات الزمنية المختلفة، وهو شرط أساسي لبناء نموذج تنبؤي موثوق باستخدام الأتمتة الخلوية وسلاسل ماركوف. وبعد استكمال عملية إعادة التصنيف، تم تصدير طبقات استخدامات الأرض المعاد تصنيفها إلى صيغة (ASCII – Text) باستخدام أداة Raster to ASCII المتاحة ضمن برنامج ArcGIS. وتكمن أهمية هذه الخطوة في تحويل البيانات النقطية (Raster) إلى تمثيل رقمي نصي للخلايا الشبكية، بما يضمن توافقها مع بيئة النمذجة في برنامج Idrisi، ولاسيّما ضمن وحدات تحليل التغيرات المكانية ونموذج (CA-Markov). وتُعد صيغة (ASCII) من الصيغ الأساسية في عمليات النمذجة المكانية، إذ تتيح تمثيلاً دقيقاً للقيم المكانية على مستوى الخلية، وتسهل إدخال البيانات في النماذج الحاسوبية المتخصصة في تحليل وتنبؤ تغير استخدامات الأرض. كما تمثل هذه الصيغة الأساس الذي تُبنى عليه مراحل احتساب احتمالات التحول، ومحاكاة التوسع الحضري المستقبلي، وتحليل الأنماط المكانية المرتبطة بالزحف العمراني وتغير البنية الحضرية. وبذلك، تشكل هذه الخطوات حلقة وصل منهجية بين مرحلة المعالجة والتصنيف من جهة، ومرحلة النمذجة التنبؤية باستخدام (CA-Markov) من جهة أخرى، بما يعزز موثوقية النتائج النهائية ويضمن دقة التنبؤ باتجاهات التغير الحضري المستقبلية(Weng, Q., 2002, pp. 273-284).
- فتح برنامج IDRISI واستيراد الطبقات في النقطة أعلاه وكما في الشكل (6).
- بعد استكمال إعداد طبقات استخدامات الأرض بصيغتها المتوافقة مع بيئة النمذجة، جرى الانتقال إلى امتداد النمذجة (Modeling) ضمن برنامج Idrisi، ومنه إلى بيئة النماذج/المحاكاة (Model Simulation)، ثم اختيار وحدة Markov، كما موضح في الشكل (7). وتُعد هذه المرحلة من الخطوات الأساسية في بناء النموذج الاحتمالي، إذ يتم خلالها احتساب مصفوفات الانتقال التي تعبّر عن احتمالات التحول بين أصناف استخدامات الأرض المختلفة استناداً إلى البيانات الزمنية المدخلة.

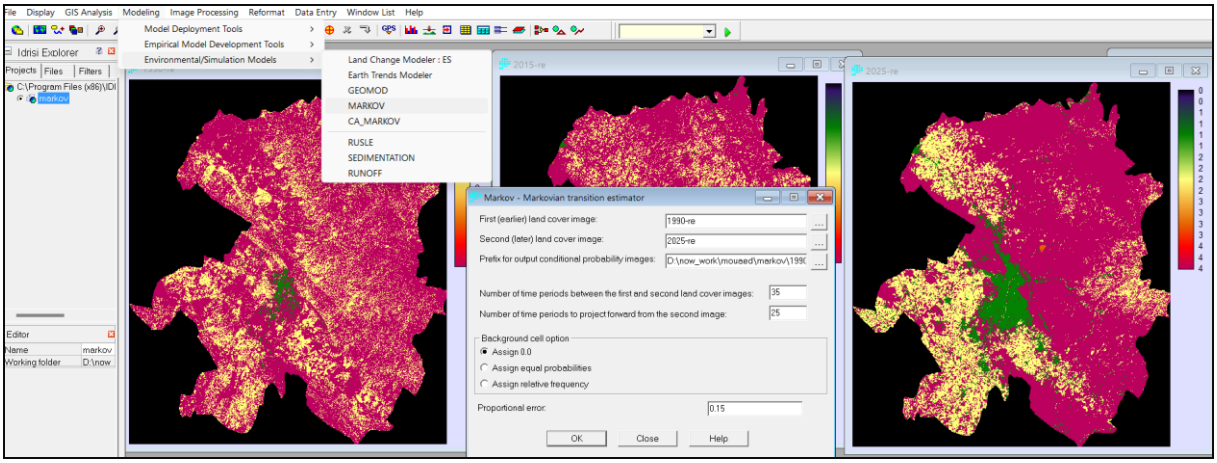
شكل (6) استيراد الطبقات الى برنامج IDRISI





المصدر: اعتماداً على بيئة برنامج (IDRISI).

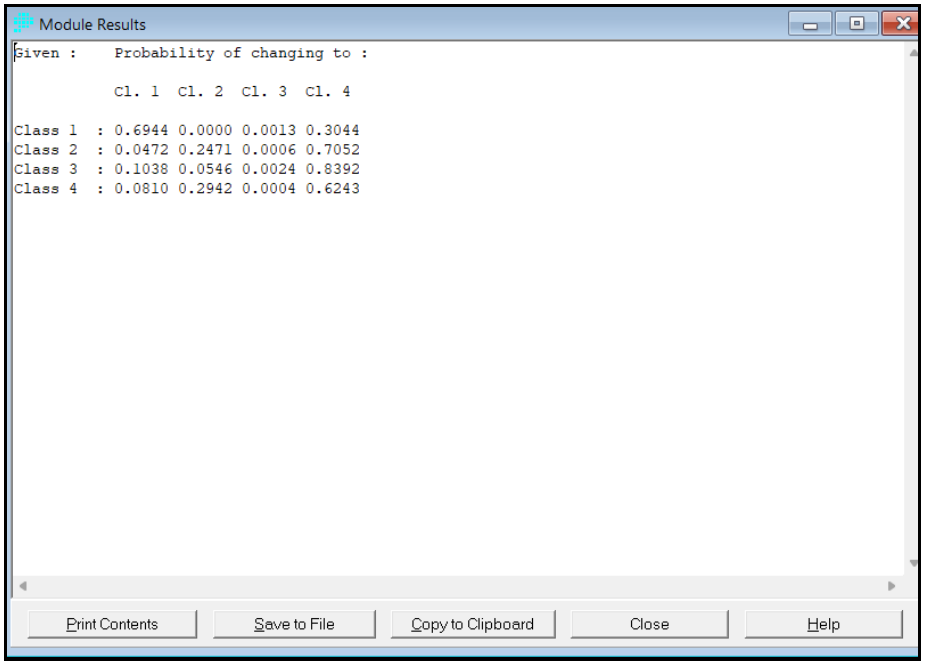
شكل (7) الية الوصول الى انموذج ماركوف



المصدر: اعتماداً على بيئة برنامج (IDRISI).

- وتُعرض مخرجات هذه العملية على شكل تقرير إحصائي يتضمن القيم الاحتمالية لكل صنف من أصناف استخدامات الأرض، كما هو موضح في الشكل (8). وتمثل هذه القيم مؤشراً رقمياً لاحتمالية التغير من صنف إلى آخر خلال الفترة الزمنية المدروسة، إذ تشير القيم التي تقترب من (0) إلى ضعف احتمالية حدوث التغير، في حين تدل القيم التي تقترب من (1) على ارتفاع احتمالية التحول، ولاسيّما باتجاه الاستعمال الحضري في المناطق التي تشهد ضغوطاً عمرانية مرتفعة. وتوفر هذه النتائج أساساً علمياً مهماً لفهم اتجاهات التغير المستقبلي لاستخدامات الأرض، كما تمثل المدخل الرئيس لمرحلة الأتمتة الخلوية، التي تقوم بدورها بمحاكاة التوزيع المكاني لهذه التحولات وفق قواعد الجوار المكاني، وبما يعكس الواقع الدينامي للتوسع الحضري في منطقة الدراسة.

شكل (8) مصفوفة احتمالية التغير وفق استعمالات الارض

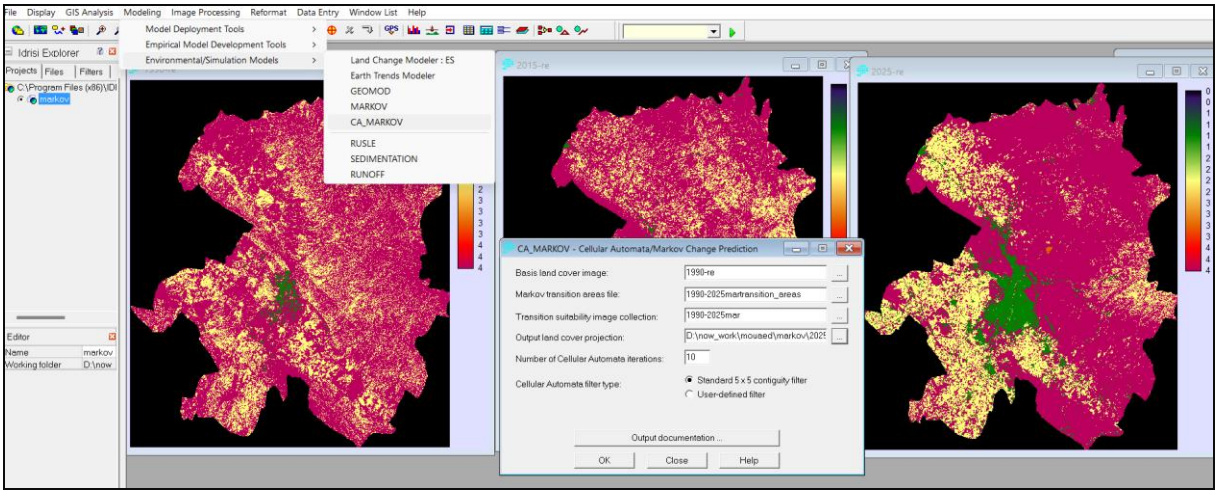


المصدر: اعتماداً على بيئة برنامج (IDRISI).

2-3. تطبيق نموذج (CA–Markov)

بعد استكمال عمليات معالجة المرئيات الفضائية وتصنيف استخدامات الأرض وتجهيز البيانات بصيغتها الملائمة للنمذجة، أصبحت قواعد البيانات مهيأة لتنفيذ عمليات التنبؤ بالتغيرات المستقبلية في استخدامات الأرض، ولاسيّما التغيرات المرتبطة بالاستعمال الحضري، إذ جرى تنفيذ النموذج ضمن بيئة النمذجة المكانية لإنتاج خرائط التنبؤ المستقبلية، ولاسيّما المتعلقة بالتوسع الحضري، استنادًا إلى قواعد الانتقال والأنماط المكانية المستخلصة، وقد تم ذلك من خلال تطبيق نموذج الأتمتة الخلوية المقترنة بسلاسل ماركوف (CA-Markov)، الذي يجمع بين التحليل الاحتمالي للتغيرات الزمنية والنمذجة المكانية القائمة على الخلايا الشبكية. يعتمد نموذج ماركوف على احتساب احتمالات انتقال أصناف استخدامات الأرض من حالة إلى أخرى استناداً إلى البيانات التاريخية، وهو ما يسمح بتقدير الاتجاهات العامة للتغير، مثل تحول الأراضي الزراعية أو المناطق المفتوحة إلى استعمالات حضرية. وفي المقابل، يضيف التحليل الخلوي الذاتي (Cellular Automata) البعد المكاني للنموذج، من خلال محاكاة انتشار هذه التحولات عبر الزمن، مع الأخذ بنظر الاعتبار تأثير الجوار المكاني والتجاورات بين الخلايا الشبكية، بما يعكس الطبيعة التراكمية والانتشارية للتوسع الحضري. ومن خلال هذا التكامل بين البعدين الاحتمالي والمكاني، يصبح من الممكن إنتاج خرائط تنبؤية توضح السيناريوهات المستقبلية لتغير استخدامات الأرض، وتبرز أنماط واتجاهات التوسع الحضري المحتملة ضمن منطقة الدراسة. وتتيح هذه الخرائط فهماً أعمق لديناميكيات النمو الحضري وتأثيراته المكانية، سواء على الأراضي الزراعية أو على المناطق ذات الحساسية البيئية. ويسهم توظيف نموذج (CA-Markov) في توفير أداة تحليلية داعمة لصنّاع القرار والمخططين الحضريين، إذ يتيح لهم استشراف مسارات التوسع الحضري المستقبلية وتقييم آثارها المحتملة، بما يساعد في توجيه السياسات التخطيطية نحو التنمية الحضرية المستدامة، والحفاظ على كفاءة استخدام الأرض، والحد من الآثار البيئية السلبية المصاحبة للنمو العمراني غير المنظم (Mondal, M.S. et al, 2020, p1587). اذ يتم الوصول اليها من خلال الشكل (9).

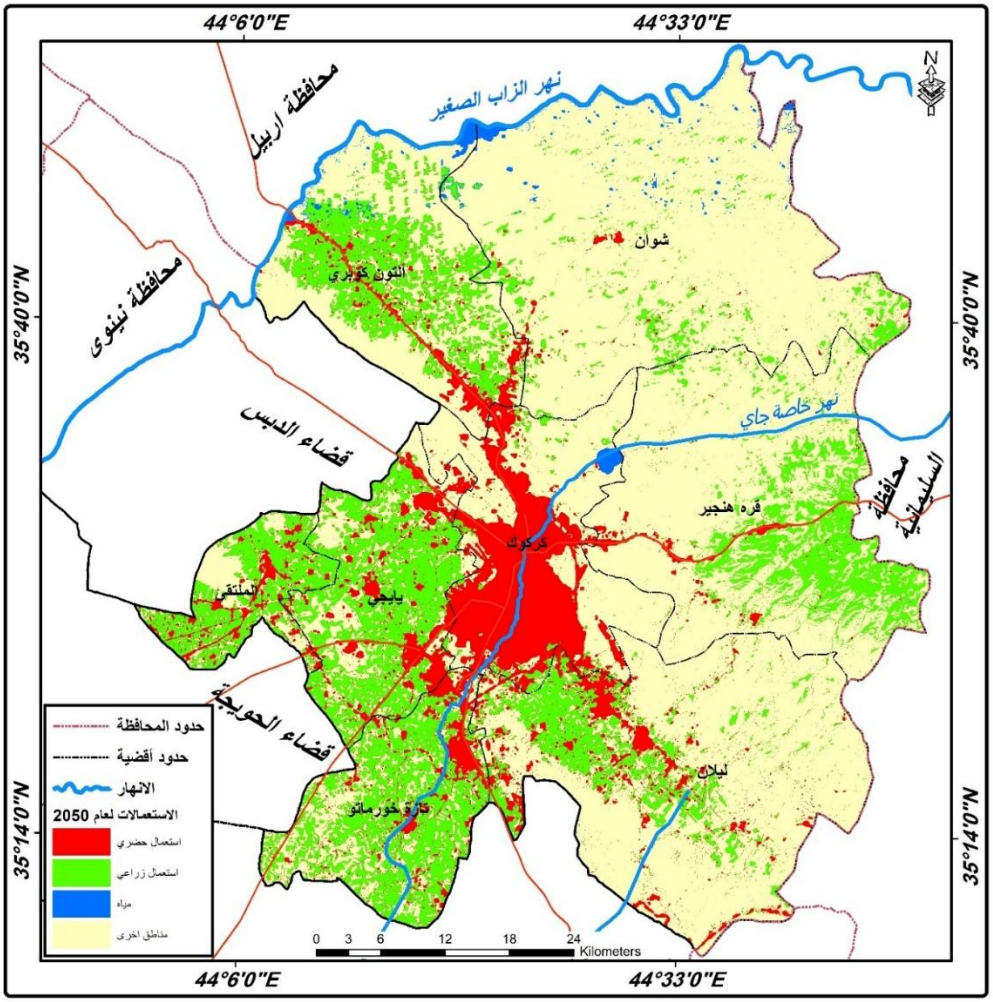
شكل (9) الية الوصول للأتمتة الخلوية وفق نموذج ماركوف



المصدر: اعتماداً على بيئة برنامج (IDRISI).

عقب الانتهاء من تنفيذ عمليات التنبؤ المكاني بتغير استخدامات الأرض باستخدام نموذج (CA-Markov)، جرى استخراج النتائج النهائية التي تعكس أنماط واتجاهات التغير المتوقعة خلال الفترات الزمنية المدروسة، ولاسيّما التغيرات المرتبطة بالاستعمال الحضري. وتمثل هذه المخرجات الأساس التحليلي لفهم المسارات المستقبلية للتوسع الحضري وانعكاساته المكانية. وفي مرحلة لاحقة، جرى تصدير نتائج التنبؤ إلى برنامج ArcGIS، بهدف معالجتها بصرياً وتحويلها إلى خرائط مكانية متكاملة تراعي القواعد الكارتوغرافية المعتمدة. وشملت هذه المرحلة ضبط عناصر الخريطة الأساسية، مثل نظام الإحداثيات، ومقياس الرسم، واتجاه الشمال، والمسميات التوضيحية، بما يسهم في رفع جودة التمثيل الجغرافي وتحسين قابلية قراءة الخرائط وتحليلها. وأتاحت بيئة ArcGIS تنفيذ مجموعة من المعالجات الإضافية، من بينها تنظيم الألوان والرموز لتمييز فئات استخدامات الأرض المختلفة بوضوح، وإبراز مناطق التوسع الحضري المتوقعة، فضلاً عن إدراج البيانات الوصفية الداعمة التي تسهم في تفسير التغيرات المكانية وتحليلها بصورة أدق. كما أُنجزت خرائط مقارنة توضح الفروق بين الأوضاع السابقة والحالات المستقبلية المتنبئ بها، بما يعزز فهم ديناميكيات التغير الحضري عبر الزمن. وتسهم هذه المرحلة في تحويل مخرجات النمذجة الرقمية إلى أدوات مكانية تطبيقية قابلة للاستخدام من قبل الباحثين والمخططين ومتخذي القرار، إذ توفر تصوراً مكانياً دقيقاً لاتجاهات التوسع الحضري المستقبلية. كما تدعم هذه الخرائط عمليات التخطيط العمراني وإدارة استخدامات الأرض على أسس علمية، وتسهم في توجيه السياسات التخطيطية نحو الاستخدام المستدام للأراضي والحد من الآثار البيئية المصاحبة للنمو الحضري غير المنظم (Zhang, X.J. et al 2017, p268–277). وكما في الخريطة (5).

خريطة (5) التنبؤ بتغير استعمالات الارض لعام 2050 في منطقة الدراسة



المصدر: اعتماداً على تطبيق انموذج(CA Markov) ومخرجات برنامج (Arc GIS V 10.8).

جدول (2) مساحة استعمالات الارض للأعوام (1990،2024، 2050) في قضاء كركوك

ت	الصنف	1990		2025		2050		مساحة التغير/كم2
		المساحة/كم2	النسبة%	المساحة/كم2	النسبة%	المساحة/كم2	النسبة%	
1	استعمال حضري	41.4	1.1	285.0	7.7	412.6	11.1	371.2
2	استعمال زراعي	870.0	23.4	817.5	22.0	890.9	24.0	20.9
4	مياه	3.4	0.1	1.4	0.0	10.5	0.3	7.1
5	مناطق اخرى	2797.8	75.4	2608.7	70.3	2398.6	64.6	−399.2
6	المجموع	3712.6	100.0	3712.6	100.0	3712.6	100.0	-

المصدر: اعتماداً على مرئيات (Landsat 5 وLandsat 8)، ومخرجات برنامج (Arc GIS V 10.8).

ويلاحظ من الخريطة (5) والجدول (2) اتجاهاً تصاعدياً واضحاً في الاستعمال الحضري ضمن قضاء كركوك خلال المدة (1990–2050)، إذ ارتفعت مساحته من (41.4 كم²) وبنسبة (1.1%) عام (1990) إلى (285.0 كم²) وبنسبة (7.7%) عام (2025)، ثم واصلت الزيادة وفق سيناريوهات التنبؤ لتبلغ (412.6 كم²) وبنسبة (11.1%) عام (2050). ويعكس ذلك زيادة كلية مقدارها (371.2 كم²)

مقارنة بسنة الأساس، وهو ما يؤكد أن الاستعمال الحضري يمثل الصنف الأكثر نمواً وتأثيراً في إعادة تشكيل البنية المكانية لاستخدامات الأرض المستقبلية.

ويُلحظ أن مرحلة التنبؤ حتى عام (2050) تشير إلى استمرار التوسع الحضري ولكن بوتيرة أكثر انتظاماً مقارنة بالفترة السابقة، إذ سجلت المساحة الحضرية زيادة مقدارها (+127.6 كم²) خلال المدة (2025–2050). ويعكس هذا الاتجاه انتقال التوسع الحضري من مرحلة النمو السريع إلى مرحلة التوسع المخطط نسبياً، مع استمرار الزحف العمراني نحو الأطراف، ولاسيّما بمحاذاة محاور النقل الرئيسة والمناطق القريبة من النواة الحضرية القائمة. وتشير نتائج التنبؤ إلى أن هذا التوسع الحضري المتوقع حتى عام (2050) سيتم على حساب أصناف استخدامات الأرض الأخرى، ولاسيّما المناطق الأخرى التي سجلت تراجعاً صافياً قدره (−399.2 كم²) خلال مدة الدراسة، مما يدل على أن هذه المناطق تمثل الخزان المكاني الرئيس للتوسع الحضري المستقبلي. وفي المقابل، يُظهر الاستعمال الزراعي استقراراً نسبياً مع ميل طفيف للزيادة ليبلغ (890.9 كم²) وبنسبة (24.0%) عام (2050)، وهو ما يشير إلى احتمال الحفاظ على بعض الرقع الزراعية أو إعادة توظيفها ضمن مناطق أقل تعرضاً للضغط الحضري.

أما المسطحات المائية فقد سجلت زيادة محدودة لتصل إلى (10.5 كم²) وبنسبة (0.3%) عام (2050)، وهي زيادة طفيفة من حيث المساحة المطلقة، إلا أنها تعكس تحسناً نسبياً في حضور هذا الصنف ضمن المشهد المكاني المستقبلي، سواء نتيجة لعوامل طبيعية أو لإجراءات تنظيمية محتملة.

وبصورة عامة، تؤكد نتائج التنبؤ لعام (2050) أن الاستعمال الحضري سيستمر بوصفه العامل الحاسم في إعادة تشكيل استخدامات الأرض في قضاء كركوك، وأن الاتجاهات المستقبلية تشير إلى توسع حضري مستمر يتطلب تدخلات تخطيطية مبكرة للحد من آثاره السلبية، ولاسيّما على الأراضي الزراعية والمناطق المفتوحة. كما تبرز أهمية اعتماد نتائج نموذج (CA-Markov) كأداة داعمة في رسم السياسات الحضرية المستقبلية وتحقيق الاستخدام المستدام للأراضي.

4. تقييم دقة الاتمتة الخلوية لمنطقة الدراسة:

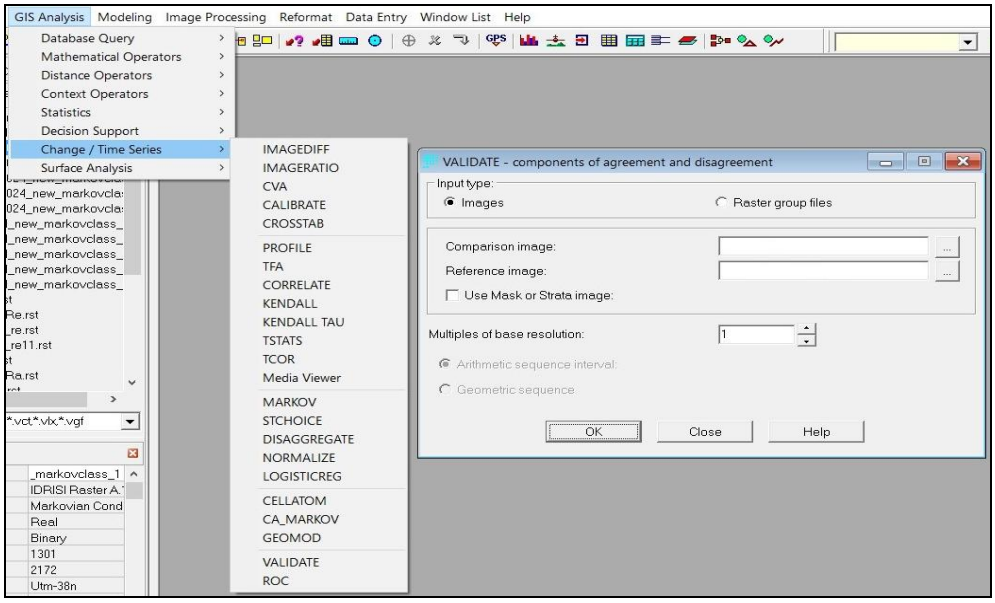
أُجريت هذه الدراسة بهدف تقييم دقّة نموذج (CA-Markov) والتحقق من موثوقية نتائجه في التنبؤ بتغير استخدامات الأرض ضمن منطقة الدراسة. وقد جرى اعتماد خريطة استخدامات الأرض لعام (1990) كسنة أساس تمثل الحالة المكانية المرجعية، في حين استُخدمت خريطة عام (2015) كمرحلة مقارنة لاحقة لاشتقاق احتمالات الانتقال وبناء النموذج التنبؤي. وبالاستناد إلى هاتين الخريطتين، طُبّق النموذج للتنبؤ بخريطة استخدامات الأرض لعام (2025).

وفي المقابل، جرى إعداد خريطة استخدامات الأرض الفعلية لعام (2025) بالاعتماد على المرئيات الفضائية الحديثة وعمليات التصنيف الرقمي، مما أتاح إمكانية إجراء مقارنة مباشرة بين نوعين من الخرائط: الأولى، تمثل الخريطة التنبؤية المستندة إلى بيانات الفترتين (1990–2015)، في حين تمثل الثانية، الخريطة المرجعية الفعلية لعام (2025) المستخرجة من البيانات الواقعية.

ولغرض التحقق من دقّة نتائج التنبؤ، جرى استخدام أداة (VALIDATE)، كما هو موضح في الشكل (10)، والتي تُعد من الأدوات الإحصائية المتخصصة في مقارنة الخرائط الفئوية. تعمل هذه الأداة على مقارنة خريطتين، تُعامل إحداهما بوصفها خريطة مقارنة نتائج نموذج (CA-Markov)، والأخرى بوصفها خريطة مرجعية تمثل الواقع الفعلي لاستخدامات الأرض (Delgado, & Bosque-Sendra, 2009. P4).

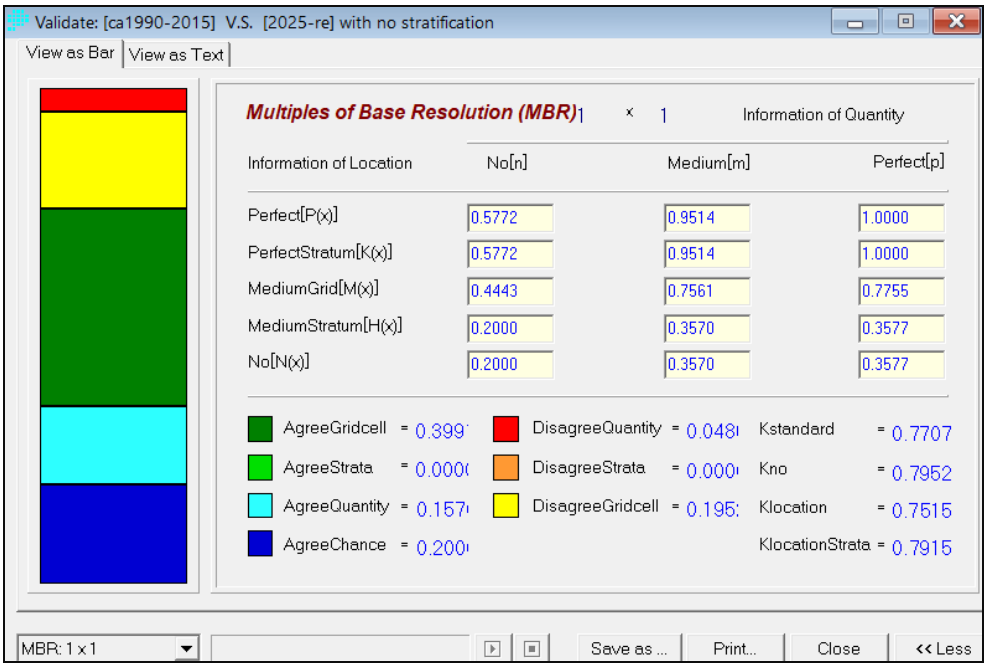
بعد إدخال المتغيرات المكانية والزمنية الموضحة في الشكل أعلاه، أُجريت عملية مقارنة بين خريطة استخدامات الأرض المتنبئ بها لعام (2025)، والمستخلصة من تطبيق نموذج (CA-Markov) بالاعتماد على بيانات الفترتين (1990–2015)، وبين خريطة استخدامات الأرض الفعلية لعام (2025) المستخرجة من المرئيات الفضائية، والتي تمثل الواقع المكاني الحقيقي لمنطقة الدراسة. وتهدف هذه المقارنة إلى تقييم مدى دقة النموذج في محاكاة التغيرات المكانية المستقبلية لاستخدامات الأرض، ولاسيّما الاستعمال الحضري، وذلك من خلال قياس درجة التطابق بين الخريطتين، كما هو موضح في الشكل (11).

شكل (10) الوصول الى أداة التحقق من صحة البيانات



المصدر: اعتماداً على بيئة برنامج (IDRISI).

شكل (11) نتائج اختبار المطابقة الرقمية للتحقق من صحة التنبؤ



المصدر: اعتماداً على بيئة برنامج (IDRISI).

أظهرت نتائج التحليل الإحصائي باستخدام أداة(VALIDATE) أن قيمة(Kstandard) بلغت (0.7707)، وهي قيمة تشير إلى مستوى دقة مرتفع نسبياً في التنبؤات المكانية، وتعكس قدرة جيدة للنموذج على محاكاة التغيرات الفعلية في استخدامات الأرض. كما سجل مؤشر(Klocation) قيمة (0.7515)، مما يدل على توافق مكاني واضح في تحديد مواقع التغير، في حين بلغت قيمة(Kno) نحو (0.7952)، وهو ما يؤكد أن نتائج النموذج ليست ناتجة عن الصدفة، بل تعكس نمطاً مكانياً حقيقياً للتغير. وبيّنت نتائج التحليل أن قيمة (AgreeGridcell) بلغت (0.399)، في حين بلغت قيمة (DisagreeGridcell) نحو (0.195)، مما يشير إلى أن نسبة كبيرة من الخلايا الشبكية قد جرى التنبؤ بمواقعها بصورة صحيحة، مع وجود بعض الاختلافات الموضعية المحدودة. أما على مستوى الدقة الكمية، فقد بلغت قيمة (AgreeQuantity) نحو (0.157) مقابل (DisagreeQuantity) بلغت (0.048)، وهو ما يدل على أن النموذج نجح بدرجة جيدة في تمثيل الحجم الكلي للتغيرات بين فئات استخدامات الأرض.

وتعكس هذه النتائج مجتمعة أن نموذج (CA-Markov) يمتلك كفاءة مناسبة في محاكاة التغيرات المكانية لاستخدامات الأرض ضمن منطقة الدراسة، ويُعد موثوقاً في استشراف اتجاهات التوسع الحضري المستقبلية. كما تبرر هذه القيم الإحصائية اعتماد النموذج في التنبؤ بعيد المدى، ولاسيّما في رسم سيناريوهات استخدامات الأرض حتى عام (2050)، ودعم قرارات التخطيط الحضري والإدارة المستدامة للأراضي على أسس علمية دقيقة.

الاستنتاجات:

1- أسهم توظيف تقنيات نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد في نقل التحليل الجغرافي من مستوى الوصف المكاني لاستخدامات الأرض إلى مستوى النمذجة التنبؤية، مما أتاح إمكانية استشراف اتجاهات التوسع الحضري المستقبلية في قضاء كركوك، ودعم التخطيط المكاني القائم على أسس علمية دقيقة.

2- أثبت نموذج الأتمتة الخلوية–ماركوف (CA-Markov) كفاءة عالية في محاكاة التغيرات المكانية لاستخدامات الأرض، ولاسيّما الاستعمال الحضري، من خلال اعتماده على الخلايا الشبكية بوصفها أصغر وحدة تحليلية، الأمر الذي عزز دقة تمثيل أنماط التوسع الحضري مكانياً وزمانياً.

3- أظهرت نتائج التنبؤ حتى عام (2050) اتجاهاً تصاعدياً مستمراً في الاستعمال الحضري على حساب الاستخدامات الأخرى، ولاسيّما المناطق المفتوحة، مما يعكس استمرار ظاهرة الزحف العمراني واتساع الرقعة الحضرية انطلاقاً من نواة مدينة كركوك نحو الأطراف، وهو ما يحمل آثاراً مباشرة على البنية المكانية واستخدامات الأرض المستقبلية.

4- بيّنت نتائج التحقق من الدقة أن النموذج حقق مستوى توافق مرتفع بين خريطة التنبؤ لعام (2025) والخريطة الفعلية، إذ بلغت قيمة (Kstandard) نحو (0.77)، وهو ما يؤكد موثوقية النموذج وقدرته على محاكاة التغيرات الواقعية لاستخدامات الأرض، ويعزز الاعتماد على نتائجه في التنبؤ بعيد المدى حتى عام (2050).

5- تؤكد النتائج النهائية أن اعتماد نموذج (CA-Markov) يمثل أداة فعّالة لدعم التخطيط الحضري المستدام في قضاء كركوك، من خلال توفير رؤية مستقبلية واضحة لاتجاهات التوسع الحضري، بما يساعد صُنّاع القرار على الحد من النمو العمراني غير المنظم، والحفاظ على كفاءة استخدام الأرض، وتحقيق التوازن بين التنمية الحضرية والاعتبارات البيئية.

التوصيات:

1. ضرورة اعتماد نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد بصورة منهجية في متابعة وتحليل تغير استخدامات الأرض في قضاء كركوك، ولاسيّما التوسع الحضري، من خلال تحديث قواعد البيانات المكانية بشكل دوري، بما يسهم في دعم التخطيط الحضري القائم على الأدلة وتقليل العشوائية في استخدام الأرض.
2. العمل على تنظيم التوسع الحضري والحد من الزحف العمراني غير المخطط، عبر توجيه النمو الحضري نحو مناطق محددة مسبقاً، وحماية الأراضي الزراعية والمناطق المفتوحة من التحول العشوائي إلى استعمالات حضرية، استناداً إلى نتائج التنبؤ المكاني حتى عام (2050).
3. إدماج نتائج نماذج التنبؤ المكاني (CA-Markov) ضمن الخطط العمرانية المستقبلية لقضاء كركوك، ولاسيّما في تحديد أولويات استخدام الأرض، ومناطق التوسع السكني والخدمي، بما يحقق توازناً بين متطلبات التنمية الحضرية والحفاظ على الموارد البيئية.
4. تعزيز السياسات التخطيطية الوقائية من خلال استثمار خرائط التنبؤ في تقييم الآثار المستقبلية للتوسع الحضري، واتخاذ إجراءات مبكرة للحد من الضغوط البيئية، ولاسيّما تلك المتعلقة بتقلص المناطق المفتوحة وارتفاع الكثافة العمرانية.
5. تشجيع تنفيذ دراسات مستقبلية تكاملية تعتمد على نماذج تنبؤية أكثر تقدماً، تجمع بين الأتمتة الخلوية والشبكات العصبية والمتغيرات الاجتماعية والاقتصادية، بهدف رفع دقة التنبؤات المكانية، وتطوير سيناريوهات حضرية بديلة أكثر استدامة لقضاء كركوك.

المصادر.

1- Liu et al, (2010), Simulating land-use dynamics under planning policies by integrating artificial immune systems with cellular automata, International Journal of Geographical Information Science, Vol. 24, No. 5.

2- المطير، محمد غانم أحمد ، أسماء عبد اله خالد الرقيب، محاكاة الأنماط الزمانية والمكانية للنمو الحضري في دولة الكويت باستخدام النموذج المدمج CA- Markov خلال الفترة من (2002 - 2045) ، المجلة الجغرافية العربية، المجلد(54)، العدد(82)، 2023.

3- الأسمري، شهرة دليم علي ، مساعد عبدالرحمن الجخيدب، رصد تغير النمو العمراني ومحاكاته في مدينة ينبع باستخدام نماذج ماركوف في بيئة نظم المعلومات الجغرافية، المجلة الجغرافية العربية، المجلد(55)، العدد(83)، 2024.

4- جمهورية العراق، وزارة التخطيط والتعاون الانمائي، الجهاز المركزي للإحصاء وتكنلوجيا المعلومات، دائرة احصاء كركوك، نتائج تعداد السكان لعام (2024).

5- محمد، سعد محمد جاسم، دور الأتمتة الخلوية في التنبؤ المكاني لتغيرات الغطاء الأرضي في منطقة العباسي باستخدام نموذج CA-Markov"، مجلة جامعة تكريت للعلوم الإنسانية، الملجد 32، العدد 27، 2025.

6- الطائي، اياد عاشور ، ثائر مظهر فهمي العزاوي، التقنيات الحديثة في الجغرافية، ط1، دار الجنان للنشر، عمان ، 2013.

7- ورود علي عبد العزيز شري الامارة، النمذجة الكارتوكرافية لخصائص التربة في قضاء الحبانية باستخدام تقنيات الجيوماتكس، رسالة ماجستير (غير منشورة)، كلية التربية للعلوم الإنسانية، جامعة الانبار، 2021.

8- ميادة محمود عبد القادر، تكامل المعلومات الجيومورفية وتقنيات التحسس النائي لدراسة دلتا شط العرب رسالة ماجستير (غير منشورة)، كلية العلوم جامعة البصرة، 2010.

9- Mondal, M.S. et al, (2020), Ca Markov Modeling Of Land Use Land Cover Change Predictions And Effect Of Numerical Iterations, Image Interval (Time Steps) On Prediction Results, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLIII-B3-2020, 2020 XXIV ISPRS Congress.

10- Chen, X.; He, X.;Wang, S,(2022) Simulated Validation and Prediction of Land Use under Multiple Scenarios in Daxing District, Beijing, China, Based on GeoSOS-FLUS Model, Sustainability, 14(18), 11428. https://doi.org/10.3390/su141811428.

11- عجرمة، أشرف عبده على، نرمين احمد محمد خليل شكري، أساليب الذكاء الاصطناعي الجغرافي في نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد بين النظرية والتطبيق، المجلة العربية الدولية لتكنولوجيا المعلومات والبيانات، المجلد الثاني - العدد الثاني أبريل _ يونيو 2022.

12- Weng, Q., (2002), Land use change analysis in the Zhujiang Delta of China using satellite remote sensing, GIS and stochastic modelling. Journal of environmental Management, 64.

13- Mondal, M.S. et al, (2020). Cellular automata (CA) contiguity filters impacts on ca Markov modeling of land use land cover change predictions results. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci, 43.

14- Zhang, X.J. et al,;(2017) Simulation and prediction of land use evolution in the Three Gorges reservoir area based on MCE-CA-Markov. J. Agric. Eng, 33.

15- Delgado, M & Bosque-Sendra, J. (2009). Validation of GIS-performed analysis. Geoinformatics for Natural Resource Management: file:///C:/Users/hp/Downloads/validation-analysis-GIS.pdf.