

النمذجة الخرائطية لتغير مساحة البحيرات في العراق

"بحيرة الثرثار وبحيرة سد الموصل انموذجاً"

أ.م.د. سلام سعود حسين

جامعه تكريت/ كلية التربية للبنات

Salam.s@tu.edu.iq

استلام البحث: 22-09-2025 مراجعة البحث: 17-10-2025 قبول البحث: 10-11-2025

الملخص

تهدف هذه الدراسة إلى النمذجة الخرائطية لتغير مساحة البحيرات في العراق، باتخاذ كل من بحيرة الثرثار وبحيرة سد الموصل أنموذجاً، من خلال تتبع وتحليل التغيرات المكانية والزمانية في المساحة المائية لتلك البحيرات للمدة من عام 1985 وحتى عام 2025، وذلك بالاعتماد على بيانات الأقمار الصناعية Landsat باستخدام المتحسسات MSS و TM و ETM+ و OLI التي تتميز بدقة مكانية وزمنية مناسبة لرصد التغيرات البيئية على المدى الطويل. كما تهدف الدراسة إلى بناء نموذج تنبؤي يعتمد على تقنيات سلاسل ماركوف (Markov Chain) والخوارزميات الخلوية (Cellular Automata) ضمن بيئة برنامج TerrSet، من أجل محاكاة الاتجاهات المستقبلية لتغير مساحة البحيرات حتى عامي 2030 و 2040. أظهرت نتائج النمذجة أن بحيرتي سد الموصل والثرثار تعرضتا لتذبذب وانحسار واضح في مساحتهما المائية، وذلك نتيجة لتغيرات مناخية وتأثيرات في إدارة الموارد المائية، إلى جانب عوامل بشرية وجيومورفولوجية متعددة. ففي عام 1985، كانت مساحة بحيرة سد الموصل عند أدنى مستوياتها بسبب تعبئة السد الجديد، لكنها شهدت زيادة تدريجية حتى عام 1995 نتيجة امتلاء الخزان واستقرار التصريف. بعد ذلك، طرأت تراجع وتقلبات على المساحة المائية بفعل التغيرات المناخية وارتفاع الطلب على المياه. وتشير التوقعات لعام 2025 إلى تراجع حاد في المساحة المائية، ناجم عن انخفاض واردات نهر دجلة وضغوط مائية متزايدة، مما يبرز الحاجة إلى اعتماد إدارة مائية تكيفية للحفاظ على البحيرة. كما أظهرت التنبؤات للعامين 2030 و 2040 استمرار انخفاض المساحات المائية إذا استمرت الظروف الحالية دون تدخل فعال. وفي ضوء ذلك، توصي الدراسة بضرورة دمج نتائج النمذجة في خطط إدارة الموارد المائية، إلى جانب تحديث البيانات بشكل دوري لرصد تأثيرات التغير المناخي والسياسات المائية على البحيرات في العراق.

الكلمات المفتاحية: تغير مساحة البحيرات، النمذجة الخرائطية، المؤشرات الطيفية، نموذج CA-Markov.

Abstract:

This study aims to perform cartographic modeling of lake area changes in Iraq, taking Tharthar Lake and Mosul Dam Lake as case studies. It involves tracking and analyzing the spatial and temporal changes in the water surface area of these lakes from 1985 to 2025. The analysis is based on satellite data from the Landsat missions, utilizing MSS, TM, ETM+, and OLI sensors, which offer suitable spatial and temporal resolution for long-term environmental monitoring. The study also aims to develop a predictive model using Markov Chain techniques and Cellular Automata algorithms within the TerrSet software environment to simulate future trends in lake area changes for the years 2030 and 2040. The modeling results revealed that both Mosul Dam Lake and Tharthar Lake have experienced significant fluctuations and reductions in their water surface areas, primarily due to climatic changes, water resource management practices, and various anthropogenic and geomorphological factors. In 1985, the area of Mosul Dam Lake was at its lowest due to the initial filling of the new dam, followed by a gradual increase until 1995, driven by reservoir saturation and stable discharges. Subsequently, the lake area saw declines and variability due to climatic fluctuations and increasing water demand. Projections for 2025 indicate a sharp reduction in water surface area as a result of decreased Tigris River inflows and increasing water stress, highlighting the urgent need for adaptive water resource management to preserve the lake. Predictions for 2030 and 2040 suggest a continued decline in lake areas if current conditions persist without effective intervention. In light of these findings, the study recommends integrating the modeling results into water resource management plans and regularly updating data to monitor the impacts of climate change and water policies on Iraqi lakes.

المقدمة

تعد الموارد المائية من الدعائم الأساسية لتحقيق التنمية المستدامة، إذ تؤدي دور محوري في دعم القطاعات الحيوية كالإنتاج الزراعي، والصناعات التحويلية، وتوفير مياه الشرب. ومع تنامي الضغوط البيئية والديموغرافية، والتغيرات المناخية الحادة، والتقلبات الهيدرولوجية في حوضي دجلة والفرات، برزت الحاجة إلى أدوات تحليلية دقيقة لفهم وتحليل الديناميكيات المكانية والزمانية لهذه الموارد. وفي هذا الإطار، تمثل النمذجة الخرائطية (Cartographic Modeling) إحدى أبرز الأساليب الجيومعلوماتية المتقدمة التي تعتمد على تكامل تقنيات الاستشعار عن بعد (Remote Sensing) ونظم المعلومات الجغرافية (GIS)، لتوفير إطار تحليلي بصري وكمي لتفسير التغيرات البيئية، وعلى وجه الخصوص التغيرات في الامتداد المساحي للمسطحات المائية السطحية.

يواجه العراق، بوصفه دولة شبه جافة، تحديات متفاقمة في إدارة موارده المائية، نتيجة للتناقص المستمر في الإيرادات النهرية العابرة للحدود، وتزايد الطلب المحلي، وتكرار موجات الجفاف. وتمثل البحيرات الطبيعية والاصطناعية مكون استراتيجي ضمن منظومة الخزن المائي، ومن بينها بحيرة الثرثار وبحيرة سد الموصل، اللتان تؤديان وظائف متعددة تشمل خزن الفيضانات، وتنظيم التصريف، وتوفير احتياطي مائي استراتيجي. وقد أظهرت الملاحظات الميدانية والتحليلات البيئية الحديثة تراجع واضح في الامتداد المساحي لهاتين البحيرتين، مما يستدعي تحليلاً مكانياً دقيقاً للكشف عن أنماط التغير ومسبباتها.

وتوفر النمذجة الخرائطية إمكانية عالية لتتبع هذه التغيرات من خلال تحليل سلاسل زمنية من المرئيات الفضائية عالية الدقة، مثل الأقمار الصناعية (Landsat) وتطبيق مؤشرات طيفية متخصصة لتمييز المياه السطحية مثل مؤشر التمييز الطيفي للمياه (NDWI Normalized Difference Water Index) ومؤشر الماء المعدل (MNDWI Modified NDWI)، ثم إدماج هذه البيانات ضمن بيئة التحليل المكاني (Spatial Analysis) في نظم المعلومات الجغرافية لإنتاج خرائط كمية رقمية توضح مدى التغير في المساحة السطحية للبحيرات بدقة مكانية وزمانية عالية.

ويمثل الجانب الخرائطي في هذه الدراسة عنصر جوهري لا يقتصر على التمثيل التصويري، بل يسهم في بناء نموذج تحليلي مفسر للتغيرات الهيدرولوجية، عبر ربط الامتداد المائي بالتغيرات المناخية. وتكمن أهمية هذه النماذج الخرائطية في دورها في رصد الاتجاهات المكانية للتغير (Spatial Change Trends)، وتحديد المناطق ذات الحساسية البيئية المرتفعة، وتقييم كفاءة الإدارة المائية خلال الفترات الزمنية المدروسة.

كما تعد هذه الدراسة مساهمة نوعية في مجال الجغرافيا التطبيقية، من خلال تسليط الضوء على فعالية التقنيات الجيومكانية في دعم اتخاذ القرار، وبناء قواعد بيانات مكانية ديناميكية قابلة للتحديث المستمر، تسهم في مراقبة التغيرات المستقبلية في المسطحات المائية، وتدعم صناع القرار في رسم سياسات تكيف مائي مستدامة.

بناءً على ما تقدم، تهدف الدراسة إلى تطبيق أسلوب النمذجة الخرائطية لتحليل التغيرات المساحية في بحيرتي الثرثار وسد الموصل، خلال فترة زمنية محددة، من خلال استخدام مؤشرات طيفية متقدمة وتقنيات التحليل المكاني، للوصول إلى فهم معمق لأنماط التغير، واقتراح توصيات عملية مبنية على الأدلة المكانية لدعم استدامة الموارد المائية في العراق.

مشكلة الدراسة

تعاني بحيرتا التراث وسد الموصل من تذبذبات واضحة في الامتداد المساحي نتيجة لعوامل مناخية وهيدرولوجية وبشرية، في ظل غياب نماذج خرائطية دقيقة ترصد هذه التغيرات وتفسر أسبابها. وتكمن المشكلة في الحاجة إلى استخدام أدوات تحليل مكانية متقدمة لرصد وتحليل التغيرات الزمانية والمكانية في مساحة هاتين البحيرتين، بما يساهم في دعم إدارة الموارد المائية في العراق.

فرضية الدراسة

توجد تغيرات مكانية وزمانية ملموسة في مساحة بحيرتي التراث وسد الموصل، ويمكن رصدها وتحليلها بدقة باستخدام النمذجة الخرائطية المعتمدة على تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية، مما يساهم في فهم العوامل المؤثرة ودعم اتخاذ القرار في إدارة الموارد المائية.

أهداف الدراسة:

- تسعى هذه الدراسة لتحقيق مجموعة من الأهداف الأساسية عبر توظيف النمذجة الخرائطية لتحليل بحيرتي التراث وسد الموصل، ومن أبرز هذه الأهداف:
- 1- رصد وتحليل التغيرات المكانية والزمانية في مساحة بحيرتي التراث وسد الموصل خلال فترة زمنية محددة باستخدام تقنيات الاستشعار عن بعد.
 - 2- تطبيق النمذجة الخرائطية باستخدام نظم المعلومات الجغرافية لتمثيل وتحليل التغيرات في المسطحات المائية بدقة مكانية وزمانية.
 - 3- تحديد العوامل المناخية والهيدرولوجية والبشرية المؤثرة على التغيرات في مساحة البحيرات وربطها بالتغيرات المكتشفة.
 - 4- توفير قاعدة بيانات مكانية رقمية تدعم عمليات المتابعة المستمرة واتخاذ القرار في مجال إدارة الموارد المائية.
 - 5- تقديم توصيات علمية وعملية تساهم في تحسين سياسات إدارة المياه والحفاظ على استدامة المسطحات المائية في العراق.

منهجية الدراسة:

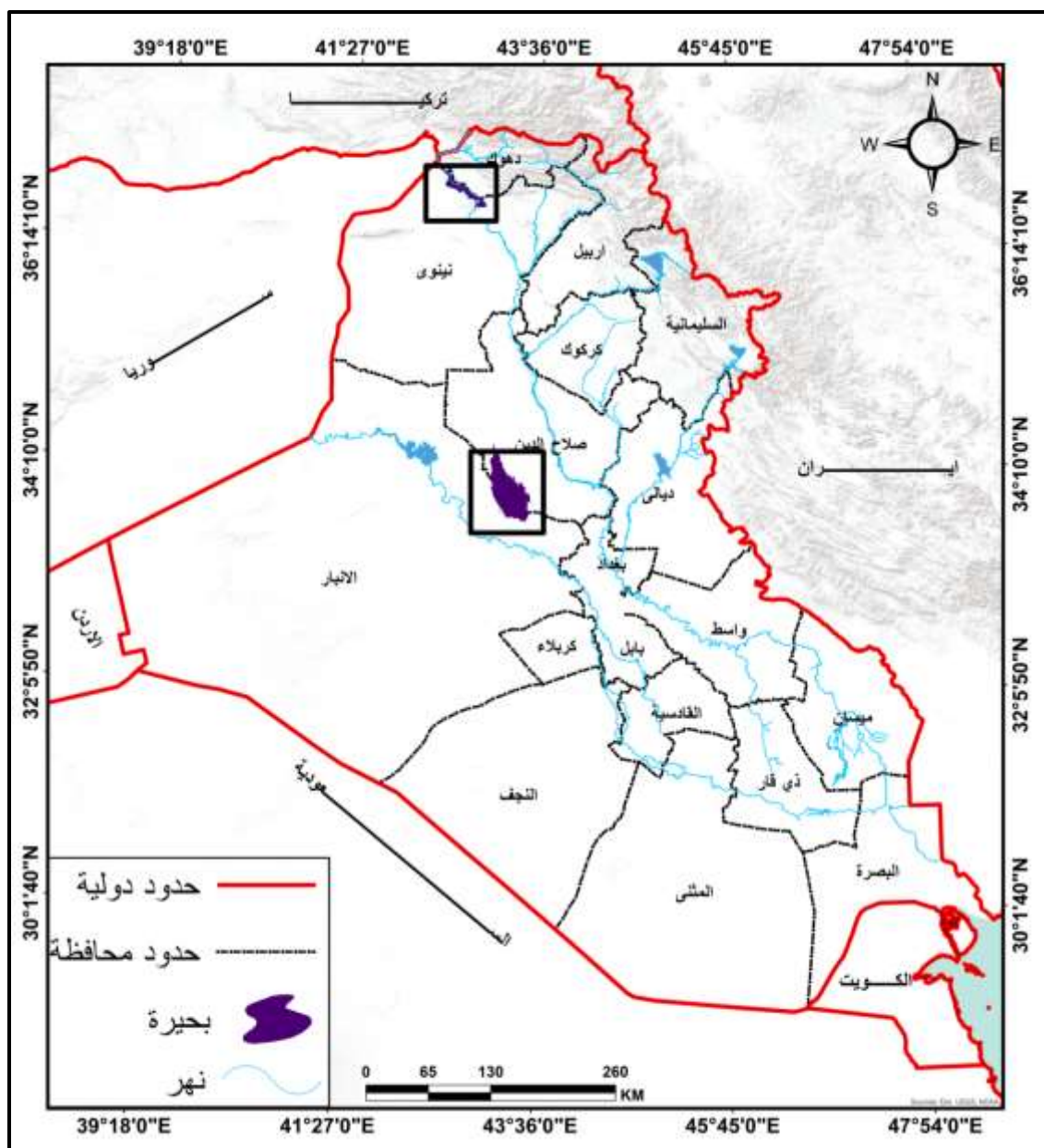
تم استخدام مجموعة من المناهج التي تلائم الدراسة منها **المنهج الوصفي**: يعتمد هذا المنهج على وصف الظاهرة الجغرافية كما هي، من خلال جمع المعلومات، وتصنيفها، وتحليلها، وعرضها بشكل دقيق. و**المنهج التحليلي**: الذي يعتمد على تحليل التغيرات الزمنية والمكانية لمساحة البحيرات من خلال مقارنة البيانات الخرائطية عبر فترات زمنية مختلفة. كما تسم استخدام **المنهج الكمي**: الذي يعتمد على جمع البيانات الرقمية من مصادر متعددة، مثل صور الأقمار الصناعية، ونماذج الارتفاعات الرقمية (DEM)، وتحليلها باستخدام برمجيات نظم المعلومات الجغرافية (GIS). و**المنهج البيئي**: الذي يركز على دراسة تأثير العوامل المناخية والبيئية، مثل التغيرات في معدلات الهطول والتبخر والتغيرات في تدفقات الأنهار المغذية للبحيرات.

موقع منطقة الدراسة:

تضم منطقة الدراسة بحيرتين رئيسيتين في العراق هما بحيرة التراث وبحيرة سد الموصل وهي كلاتي:

- **موقع بحيرة الثرثار:** تمتد بحيرة الثرثار بين محافظتي الأنبار وصلاح الدين، شمال غرب العراق، بين نهر دجلة ونهر الفرات، وتقع بين دائرتي عرض (34° 3' 02" - 33° 47' 20") شمالاً وخطي طول (43° 30' 50" - 3° 20' 43") شرقاً، تحدها ادارياً قضائي الفلوجة والرمادي التابعة لمحافظة الانبار، وقضاء سامراء وتكريت التابعة لمحافظة صلاح الدين. خريطة (1).
- **موقع بحيرة سد الموصل:** تقع في محافظة نينوى، شمال العراق، على نهر دجلة، وتحديداً بالقرب من مدينة الموصل، وتقع بين دائرتي عرض (36° 49' 30" - 36° 40' 30") شمالاً وخطي طول (42° 56' 0" - 0° 42' 37") شرقاً. خريطة (1).

خريطة (1) موقع منطقة الدراسة



المصدر: مر
1000000

1- منصات الاستشعار عن بعد المستخدمة في رصد البحيرات:

تم في هذه الدراسة استخدام سلسلة من الأقمار الصناعية لاندسات من أجيال مختلفة لرصد ومراقبة منطقة الدراسة، حيث تم اختيار متحسسات متعددة لضمان توفير بيانات زمنية دقيقة تغطي فترات مختلفة تمتد من عام 1985 وحتى عام 2025. جدول (1).

1-1 تم استخدام متحسس (MSS : Multispectral Scanner System) على القمر الصناعي لاندسات 1 لرصد المنطقة عام 1985. يعد متحسس MSS من أوائل المتحسسات التي تم إطلاقها على سلسلة لاندسات، ويتميز بتوفير بيانات طيفية متعددة النطاقات مع دقة مكانية تصل إلى حوالي 79 متراً. ورغم دقته المحدودة مقارنة بالمتحسسات الحديثة، إلا أن MSS كان أداة مهمة في تمكين الدراسات البيئية الأولى، وخاصة في تتبع المسطحات المائية والتغيرات الحضرية، حيث يمكن من خلال نطاقاته الطيفية تحديد المياه والغطاء النباتي⁽¹⁾.

2-1 تم الاعتماد على متحسس (TM : Thematic Mapper) التابع لأقمار لاندسات 4 و5 لرصد الفترة بين عامي 1990 و1995. يتميز TM بتحسين كبير في الدقة المكانية التي تصل إلى 30 متراً، بالإضافة إلى زيادة عدد النطاقات الطيفية إلى سبعة، مما أتاح قدرة أفضل على التمييز بين مختلف أنواع الأراضي والمسطحات المائية. وقد لعب TM دوراً مهماً في الدراسات الهيدرولوجية ورصد البحيرات، إذ يوفر تفاصيل أكثر دقة حول الحدود المائية والتغيرات الطيفية في المساحات المائية التي قد لا تكون واضحة باستخدام MSS⁽²⁾.

3-1 وقد تم استخدام متحسس (ETM⁺ : Enhanced Thematic Mapper Plus) على قمر لاندسات 7 لرصد السنوات 2000، 2005، و2010. يحمل ETM⁺ مزايا إضافية مثل نطاق طيفي جديد في المجال الحراري، ودقة مكانية ثابتة 30 متراً في النطاقات المرئية والأشعة تحت الحمراء، مع إمكانية الحصول على بيانات حرارية بدقة 60 متراً، الأمر الذي يعزز قدرة تحليل الموارد المائية، خصوصاً في فصل المياه عن المسطحات الأخرى. كما يمكن ETM⁺ من الكشف عن التغيرات الموسمية والسنوية في المسطحات المائية بدقة عالية، مما يجعله أداة أساسية في رصد تغيرات مساحة البحيرات مثل بحيرة التارار وسد الموصل⁽³⁾.

4-1 أما في الفترات الأحدث (2015، 2020، و2025)، فقد تم الاعتماد على متحسس OLI : Operational Land Imager) التابع لقمر لاندسات 8، الذي يمثل أحدث جيل من متحسسات لاندسات. يتميز OLI بدقة مكانية تبلغ 30 متراً مع تحسينات في جودة البيانات الطيفية وزيادة عدد النطاقات، بما في ذلك نطاقات مخصصة لرصد الغطاء النباتي والمسطحات المائية بشكل أدق⁽⁴⁾. كما يتمتع OLI بكفاءة عالية في معالجة الضوضاء والظروف الجوية، مما يجعله الأنسب لمتابعة التغيرات البيئية الدقيقة والبعيدة المدى. بفضل هذه الخصائص، يستطيع OLI تقديم معلومات مفصلة وحيوية حول التغيرات في مساحة البحيرات، مما يدعم عملية النمذجة الخرائطية وتحليل تطور المسطحات المائية في منطقة الدراسة بدقة فائقة⁽⁵⁾. شكل (1).

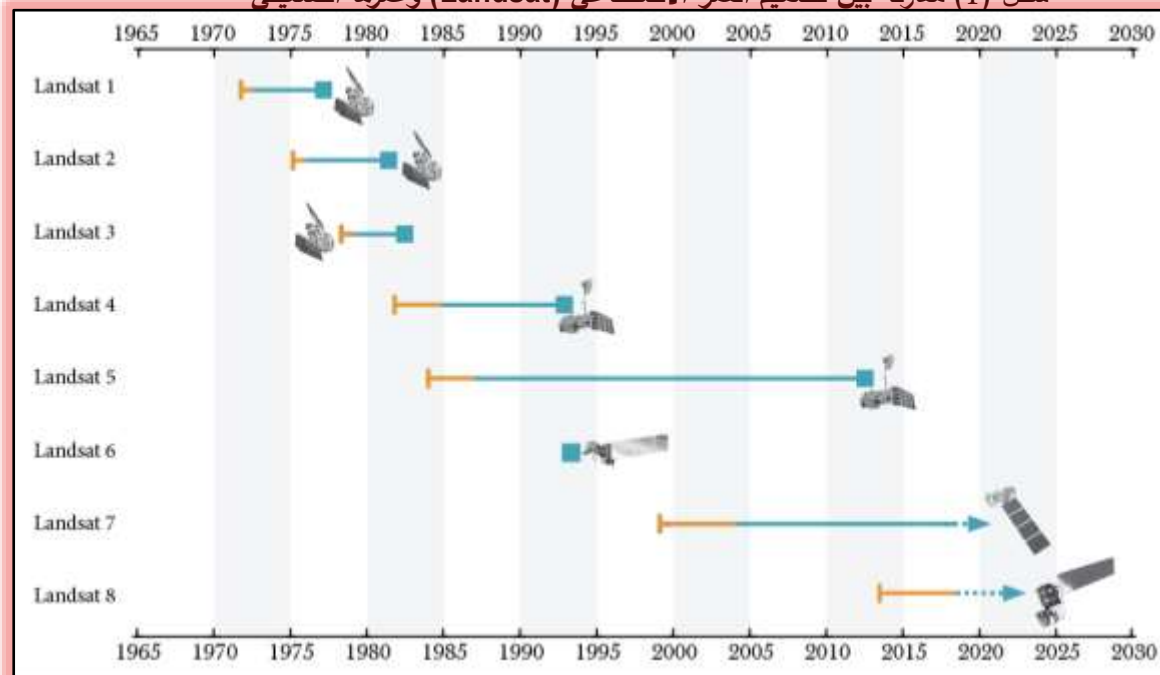
باستخدام هذه المتحسسات المختلفة عبر الزمن، تمكنت الدراسة من بناء قاعدة بيانات زمنية مكانية شاملة توضح تطور مساحة بحيرتي الثرثار وسد الموصل، مما أتاح تتبع التغيرات بشكل دقيق ومتكامل عبر عقود من الزمن، واستيعاب تأثير العوامل البيئية والإدارية المختلفة على هذه الموارد المائية الحيوية.

جدول (1) منصات الاقمار الاصطناعية المستخدمة في الدراسة

المشاهدة	فترة المراقبة (تكرار المرور)	الدقة المكانية (م)	الجيل (Generation)	سنوات الاستخدام في الدراسة	المتحسس (Sensor)	القمر الصناعي
1	18 يوماً	79 × 79	الجيل الأول	1985	Multispectral Scanner System (MSS)	Landsat 1
1	16 يوماً	30 × 30	الجيل الثاني	1990–1992	Thematic Mapper (TM)	Landsat 4
1	16 يوماً	30 × 30	الجيل الثاني	1992–2012	Thematic Mapper (TM)	Landsat 5
1	16 يوماً	30 × 30	الجيل الثالث	1999–2013	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	Landsat 7
1	16 يوماً	30 × 30	الجيل الرابع	2013–2025	Operational Land Imager (OLI)	Landsat 8

المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على المراثيات الفضائية المستخدمة في الدراسة.

شكل (1) مقارنة بين تصميم القمر الاصطناعي (Landsat) وعمرها التشغيلي



2- المؤشر

تم في هذه الدراسة الاعتماد على مجموعة من المؤشرات الطيفية التي تستخدم على نطاق واسع في تحليل صور الأقمار الصناعية لرصد المسطحات المائية، وبشكل خاص البحيرات. وتعتمد هذه المؤشرات على اختلاف الخصائص الطيفية للماء مقارنة بالعناصر الأخرى على سطح الأرض مثل التربة والغطاء النباتي، مما يمكنها من تمييز المياه بدقة نسبية عالية. جدول (2).

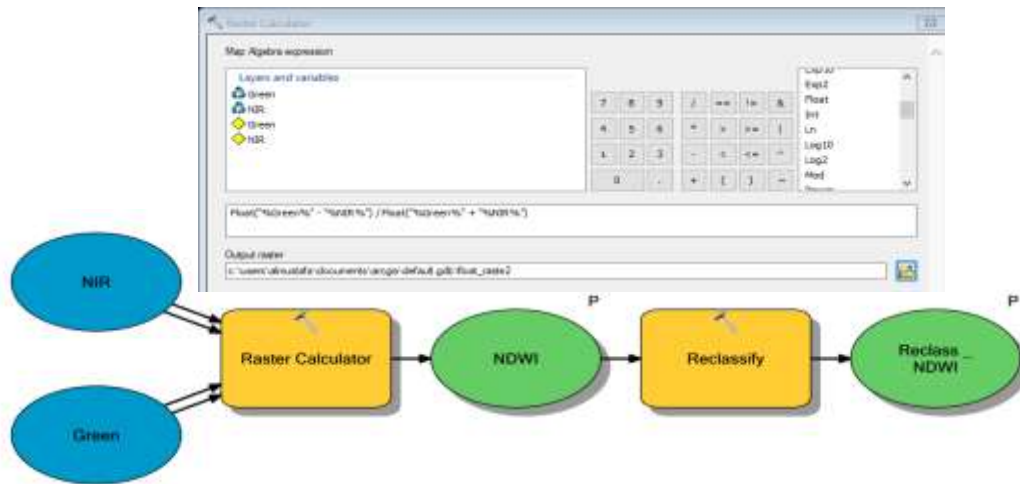
جدول (2) المؤشرات الطيفية المستخدمة في رصد ومراقبة المياه

المعادلة	الاسم الإنجليزي	الاسم العربي
$NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR)$	Normalized Difference Water Index	مؤشر الفرق المعياري للمياه (NDWI)
$MNDWI = (Green - SWIR1) / (Green + SWIR1)$	Modified Normalized Difference Water Index	مؤشر المياه المعدل (MNDWI)
$WI = Green / NIR$	Water Index	مؤشر الماء (WI)

- 1-McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. International Journal of Remote Sensing, 17(7), 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- 2-Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. International Journal of Remote Sensing, 27(14), 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
- 3-Allen, R. G., Tasumi, M., & Trezza, R. (2007). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Model. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 133(4), 380–394. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:4\(380\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380)).

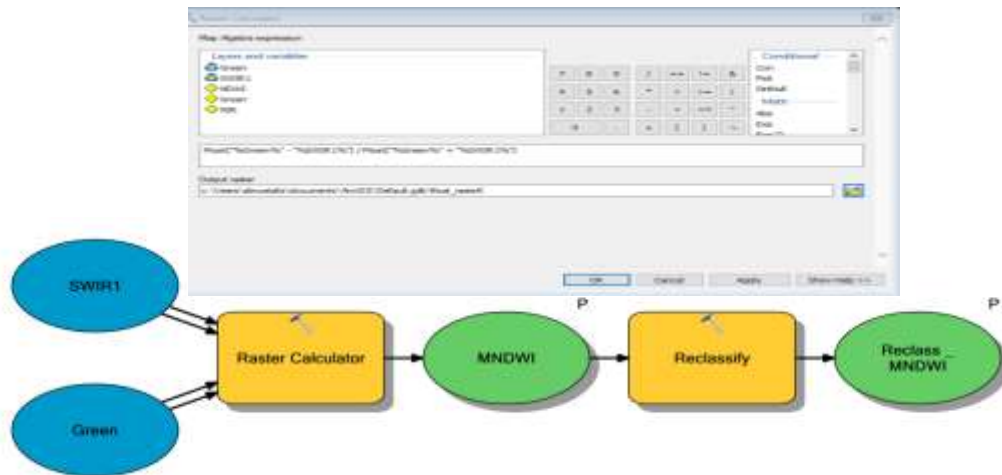
1-2 مؤشر الفرق المعياري للمياه (NDWI): هو من أول وأبرز المؤشرات الطيفية التي تعتمد على الفرق بين نطاق الطيف الأخضر ونطاق الأشعة تحت الحمراء القريبة (NIR) لتحديد وجود المياه السطحية. ويعكس هذا المؤشر قدرة الماء على امتصاص الأشعة تحت الحمراء، حيث تظهر المياه بقيم موجبة عالية على هذا المؤشر، في حين تظهر اليابسة والغطاء النباتي بقيم منخفضة أو سالبة، مما يسهل عملية فصل المسطحات المائية بدقة. يتراوح مقياس NDWI بين 1- و 1+، وتعتبر القيم الموجبة، خاصة التي تتجاوز الصفر، مؤشراً قوياً على وجود المياه. ورغم فعالية NDWI في الكشف عن المياه العذبة، إلا أنه قد يتأثر أحياناً بالغطاء النباتي الكثيف أو الظلال⁽⁶⁾. شكل (2).

شكل (2) نمذجة مؤشر (NDWI) في بيئة نظم المعلومات الجغرافية



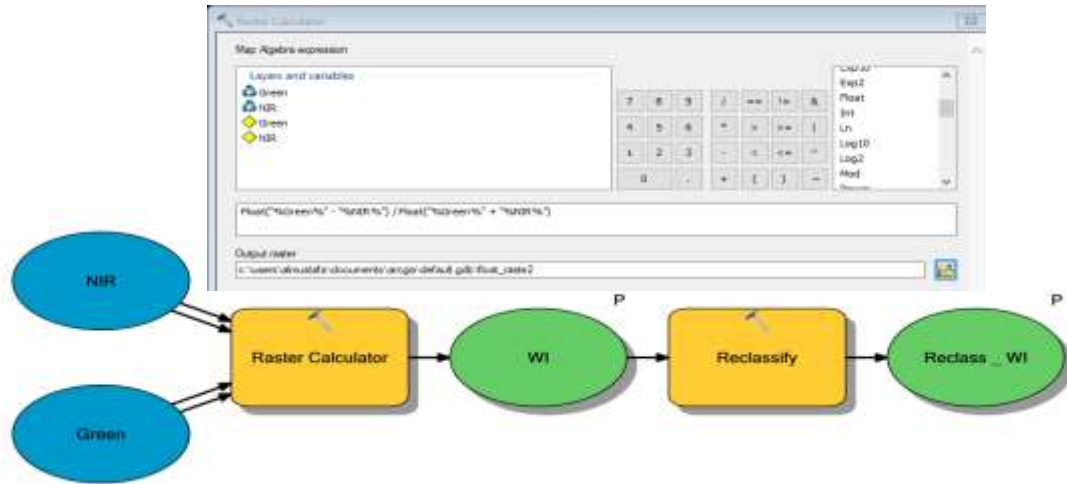
2-2- مؤشر المياه المعدل (MNDWI): فهو تعديل على NDWI حيث يستبدل نطاق الأشعة تحت الحمراء القريبة بنطاق الأشعة تحت الحمراء قصيرة الموجة (SWIR1). يتميز هذا التغيير بزيادة القدرة على التمييز بين المياه والمساحات الأخرى، خصوصاً في البيئات الحضرية والمناطق التي تختلط فيها المياه بالنباتات أو المواد الصلبة، مما يجعله أكثر حساسية ودقة في تمييز المسطحات المائية. ويأخذ MNDWI أيضاً قيماً تتراوح بين 1- و 1+، حيث تعكس القيم الموجبة وجود المياه بدقة أكبر في الظروف المعقدة مقارنة بـ NDWI⁽⁷⁾. شكل (3).

شكل (3) نمذجة مؤشر (MNDWI) في بيئة نظم المعلومات الجغرافية



2-3 مؤشر الماء (WI): فيحسب كنسبة انعكاس بين النطاق الأخضر ونطاق الأشعة تحت الحمراء القريبة، ويستخدم لتعزيز التمييز بين المياه واليابسة. يختلف هذا المؤشر في كونه لا يمتلك نطاقاً محدداً صارماً مثل NDWI و MNDWI، إذ تكون قيمه نسبية وعادة ما تكون موجبة، ويستخدم غالباً كمؤشر تكميلي لتحسين دقة تصنيف المسطحات المائية عند دمج مع المؤشرات الأخرى⁽⁸⁾. شكل (4).

شكل (4) نمذجة مؤشر (WI) في بيئة نظم المعلومات الجغرافية



تتمثل أهمية هذه المؤشرات في كونها تتيح معالجة الصور الفضائية بطريقة كمية تمكن من إنتاج خرائط دقيقة للمساحات المائية في أوقات مختلفة، مما يسهل رصد التغيرات في مساحة البحيرات ومتابعة تحركاتها الموسمية والسنوية. وباستخدام هذه المؤشرات بشكل متكامل مع نظم المعلومات الجغرافية، يمكن تتبع الأنماط المكانية والزمنية لتغيرات البحيرات بدقة عالية، مما يعزز فهم التأثيرات البيئية والإدارية على هذه الموارد المائية الحيوية.

3- توظيف المؤشرات الطيفية وفق أجيال القمر الصناعية (Landsat):

تختلف أجيال القمر الاصطناعي (Landsat) من حيث نوع المتحسسات، وعدد النطاقات الطيفية، والدقة المكانية، مما يؤثر على كيفية تطبيق المؤشرات الطيفية لاستخراج المساحات المائية ورصد البحيرات. جدول (3).

3-1 الجيل الأول (Landsat 1 - MSS): يتميز متحسس MSS بنطاقات طيفية محدودة ودقة مكانية منخفضة (حوالي

79 متراً)، حيث يحتوي على نطاق أخضر ولكن يفتقر إلى نطاق الأشعة تحت الحمراء قصيرة الموجة (SWIR). لذا، في هذا الجيل يمكن تطبيق مؤشر NDWI فقط، باستخدام نطاق الأخضر و NIR المتوفر، لكن دقة الكشف تكون محدودة نسبياً، ولا يمكن تطبيق مؤشر MNDWI بسبب عدم توفر نطاق SWIR. لذلك، يعتمد تحليل المياه بشكل رئيسي على NDWI مع الاعتراف بوجود بعض التداخلات المحتملة مع الظلال أو الغطاء النباتي⁽⁹⁾.

3-2 الجيل الثاني (Landsat 4 و 5 - TM): تتيح متحسسات TM تحسناً كبيراً في جودة الصور ودقة 30 متراً مع توفر

نطاقات أخضر، NIR، و SWIR. هذا يسمح بتطبيق مؤشرات NDWI و MNDWI بفعالية، حيث يستخدم مؤشر NDWI في الحالات العامة، بينما يفضل MNDWI في المناطق الحضرية أو التي تحتوي على غطاء نباتي كثيف. مؤشر WI يمكن أيضاً استخدامه هنا لتعزيز نتائج التصنيف. تعد بيانات TM نقطة تحول في رصد المياه بفضل زيادة الدقة الطيفية والمكانية.

3-3 الجيل الثالث (Landsat 7 - ETM⁺): يحافظ متحسس ETM⁺ على نفس دقة 30 TM متراً لكنه يضيف

نطاقات جديدة في المجال الحراري، ما يتيح دراسات أكثر تعقيداً تشمل الحرارة، لكنها ليست ضرورية لتطبيق المؤشرات الطيفية للمياه مباشرة. يمكن تطبيق جميع المؤشرات الثلاثة (WI، MNDWI، NDWI) مع تحسينات طفيفة في جودة

البيانات ووضوح الحدود المائية. كما أن التصحيحات الإشعاعية والهندسية المتقدمة في ETM+ تساعد في رفع دقة تتبع التغيرات المائية⁽¹⁰⁾.

3-4 الجيل الرابع (OLI - Landsat 8): يقدم متحسس OLI جودة أعلى مع دقة 30 متراً وعدد أكبر من النطاقات الطيفية المحسنة، بما في ذلك نطاقات أخضر، NIR، و SWIR ذات جودة عالية. يسمح ذلك بتطبيق مؤشرات NDWI، MNDWI، و WI بأفضل شكل ممكن، حيث تتميز صور OLI بوضوح عالٍ، تقليل الضوضاء، وتصحيح أفضل للظروف الجوية، ما يعزز دقة استخراج المسطحات المائية. وهذا مهم بشكل خاص في دراسة البحيرات ذات التغيرات الدقيقة أو في المناطق ذات التداخل الطيفي المعقد⁽¹¹⁾.

جدول (3) تطبيق المؤشرات الطيفية لرصد المياه وفق أجيال القمر الصناعية (Landsat)

القمر الصناعي / الجيل	سنوات الاستخدام	الدقة المكانية	النطاقات الطيفية وطول الموجة (ميكرومتر)	المؤشرات الطيفية الممكن تطبيقها	نقاط القوة	التحديات
Landsat 1 (الجيل الأول)	1972 - 1983	79~ متر	الأخضر (0.5-0.6)، NIR (0.7-0.8)	NDWI	توفر بيانات زمنية مبكرة، وجود نطاقات ضرورية للمياه	دقة مكانية منخفضة، عدم وجود نطاق SWIR لتطبيق MNDWI
Landsat 4 و 5 (الجيل الثاني)	1982 - 2012	30 متر	الأخضر (0.52- 0.60)، NIR (0.76- 0.90)، SWIR1 (1.55-1.75)	NDWI، MNDWI، WI	دقة مكانية محسنة، توفر نطاق SWIR يعزز تمييز المياه	بعض المشكلات في جودة الصور خاصة قرب نهاية فترة التشغيل
Landsat 7 (الجيل الثالث)	حتى - الآن 1999	30 متر	الأخضر (0.52- 0.60)، NIR (0.77- 0.90)، SWIR1 (1.55-1.75)	NDWI، MNDWI، WI	تحسينات في جودة الصور، إضافة نطاق حراري للتحليل الأخرى	فقدان بيانات (Scan Line Corrector Failure) في بعض الصور
Landsat 8 (الجيل الرابع)	حتى - الآن 2013	30 متر	الأخضر (0.53- 0.59)، NIR (0.85- 0.88)، SWIR1 (1.57-1.65)	NDWI، MNDWI، WI	جودة بيانات عالية، تقليل الضوضاء، تحسين التصحيحات	متطلبات معالجة بيانات أكبر بسبب كثافة النطاق

1-USGS Landsat Missions: <https://www.usgs.gov/landsat-missions>

2-Roy, D.P., et al. (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. Remote Sensing of Environment, 145, 154-172. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.001>

3-McFeeters, S.K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. International Journal of Remote Sensing, 17(7), 1425-1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>

4-Xu, H. (2006). Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. International Journal of Remote Sensing, 27(14), 3025-3033
<https://doi.org/10.1080/01431160600589179>

5-USGS Landsat 8 OLI Technical Guide : <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/landsat-8-oli-instrument>

4- نمذجة الخرائطية لتغير مساحة البحيرات:

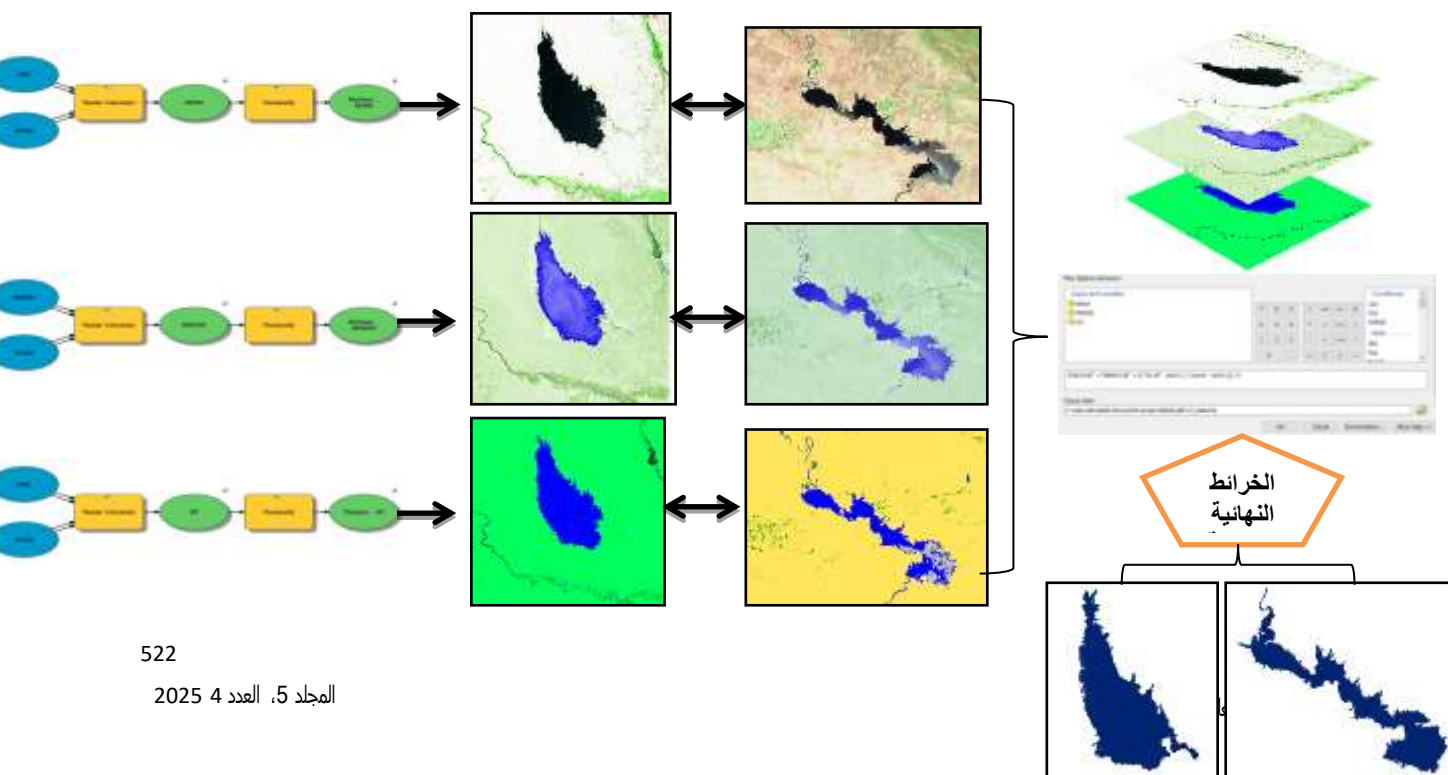
تعرف النمذجة الخرائطية بأنها عملية استخدام البيانات الفضائية والرقمية لتمثيل الظواهر الجغرافية بصورة مكانية وزمانية دقيقة من خلال توظيف أدوات الاستشعار عن بعد (Remote Sensing) ونظم المعلومات الجغرافية (GIS). وهي تعد أداة تحليلية مهمة تستخدم في إنتاج خرائط رقمية تصف الواقع الجغرافي وتمكن من تتبع التغيرات التي تطرأ على الظواهر الطبيعية، ومن ضمنها البحيرات والمسطحات المائية⁽¹²⁾.

تكمن أهمية النمذجة من قدرتها على تحويل البيانات الخام إلى معلومات مكانية قابلة للتحليل والمقارنة، مما يسمح بتحديد الاتجاهات الزمنية والمكانية لأي تغير بيئي أو هيدرولوجي. وتعد البحيرات من أهم المؤشرات البيئية الحساسة لتغيرات المناخ والممارسات البشرية، لذا فإن تتبع تغير مساحتها عبر الزمن يمثل أحد أهم تطبيقات النمذجة الخرائطية، خاصة في المناطق الجافة أو شبه الجافة مثل العراق.

تكتسب النمذجة أهميتها البالغة في دراسة بحيرتي الثرثار وسد الموصل كمثالين حيويين، نظراً لتعرضهما المستمر لتغيرات في الحجم والمساحة بفعل العوامل المناخية والتدخل البشري. فمن خلال نمذجة التغيرات التي طرأت على مساحتهما باستخدام مرئيات الأقمار الصناعية والمؤشرات الطيفية (WI, MNDWI, NDWI)، أمكن تحديد الأنماط الزمنية لتقلص أو توسع المسطحات المائية فيهما، وتحليل العلاقة بين هذه التغيرات والعوامل الطبيعية أو الإدارية المؤثرة. شكل (5).

وعليه، فإن النمذجة الخرائطية توفر إطاراً علمياً متكاملاً لرصد وتحليل البحيرات بدقة عالية، وتسهم بشكل فعال في دعم اتخاذ القرار في إدارة الموارد المائية، وتقديم بيانات كمية مكانية ضرورية لفهم التحولات البيئية في منطقة الدراسة وسواها.

شكل (5) النمذجة النهائية لمساحة البحيرات



4-1 نمذجة تغير مساحة بحيرة الثرثار:

تشير نتائج جدول (4) وشكل (6) ونموذج (2) إلى وجود تذبذب واضح في المساحة بحيرة الثرثار للمدة (1985 - 2025) مما يعكس تأثيراً مركباً للعوامل المناخية والهيدرولوجية والبشرية. ويلاحظ أن هذا التغير لا يسير وفق نسق خطي ثابت، بل يتأثر بتغير الظروف المناخية السنوية وتوزيع الموارد المائية في العراق، فضلاً عن السياسات المائية الإقليمية والدولية.

في عام 1985، بلغت مساحة بحيرة الثرثار (2234.19 كم²)، أي ما يعادل (12.8%) من المساحة الكلية التراكمية المحسوبة خلال الفترة، وهي مساحة مرتفعة نسبياً تعكس حالة مائية جيدة، ربما تعود إلى وفرة الأمطار أو تدفقات نهريّة عالية، مما أتاح خزن كميات كبيرة من المياه في البحيرة. أما في عام 1990، فقد انخفضت المساحة إلى (2056.63 كم²) بنسبة (11.8%)، مما يدل على تأثر البحيرة بانخفاض الهطول المطري أو بعمليات تنظيم وتحويل المياه نحو خزانات أخرى مثل الحبانية أو الرزازة، فضلاً عن ازدياد عمليات السحب لأغراض الزراعة. وشهد عام 1995 أعلى توسع مكاني للبحيرة خلال السلسلة الزمنية، حيث بلغت المساحة (2397.64 كم²) بنسبة (13.8%) من الإجمالي، وهو ما قد يعزى إلى تعرض المنطقة لفيضانات أو إلى استراتيجية خزن مائي موسعة، استخدمت فيها البحيرة كمستودع مائي مؤقت للفائض الناتج عن الفيضانات أو زيادات مفاجئة في تصارييف نهر الفرات. إلا أن هذا التوسع لم يستمر، حيث سجل عام 2000 تراجعاً واضحاً في المساحة إلى (1663.72 كم²) بنسبة (9.6%)، في ظل ظروف مناخية جافة ضربت العراق أواخر التسعينيات، أدت إلى انخفاض مستويات المياه الجوفية والسطحية، فضلاً عن زيادة الطلب على المياه لأغراض الزراعة والاستهلاك البشري. وفي عام 2005، ارتفعت مساحة البحيرة نسبياً لتصل إلى (1965.62 كم²) بنسبة (11.3%)، مما قد يعكس تحسناً نسبياً في الإمدادات المائية أو تعديل السياسات المائية الداخلية المتعلقة بإدارة الخزانات، تلاه انخفاض آخر في عام 2010 لتبلغ المساحة (1718.23 كم²) بنسبة (9.9%)، نتيجة استمرار الظروف الجافة وتراجع واردات المياه من دول الجوار بسبب بناء السدود على نهري دجلة والفرات.

واستمر هذا التناقص في عام 2015، إذ بلغت مساحة البحيرة (1656.48 كم²) بنسبة (9.5%)، في ظل تفاقم أزمة المياه الإقليمية وزيادة الضغوط المحلية على موارد المياه. إلا أن عام 2020 شهد عودة واضحة للارتفاع، إذ بلغت المساحة (2199.57 كم²) بنسبة (12.7%)، وهو ما يمكن تفسيره بحدوث فيضانات موسمية أو زيادة مؤقتة في الواردات المائية، مما أعاد تنشيط دور بحيرة الثرثار كخزان احتياطي للطوارئ.

أما في عام 2025، فتظهر التقديرات المستقبلية تراجعاً حاداً في مساحة البحيرة إلى (1495.01 كم²) بنسبة (8.6%)، وهو أدنى مستوى ضمن السلسلة الزمنية. يعكس هذا التراجع التأثير المستمر للتغير المناخي، وتزايد درجات الحرارة، وتراجع الإيرادات المائية العابرة للحدود، إلى جانب استمرار الممارسات غير المستدامة في استخدام المياه، وهو ما ينذر بأزمة مائية قد تهدد الأمن المائي في المنطقة. خريطة (3).

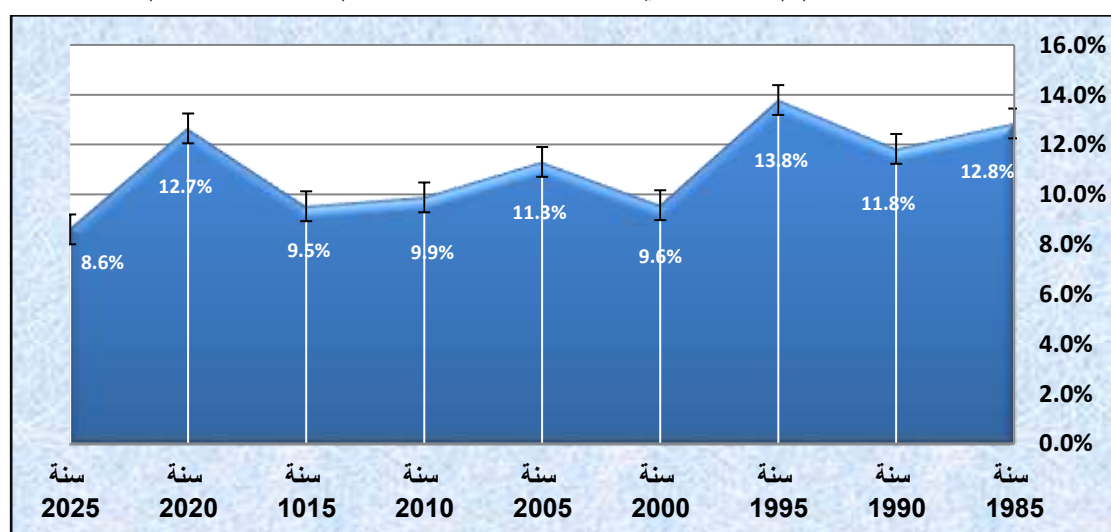
بالمجمل، بلغت المساحة التراكمية للبحيرة خلال هذه الفترة (17387.10 كم²)، مقسمة على تسع سنوات رصد، وبنسبة كلية قدرها (100%). ويبرز هذا التوزيع غير المتوازن أهمية وضع سياسات مائية طويلة الأمد تعتمد على بيانات مرصودة ونماذج تنبؤية دقيقة، لضمان استدامة موارد المياه السطحية، خصوصاً في ظل التحولات المناخية والسياسية المعاصرة. كما تبين النتائج الدور الاستراتيجي لبحيرة الثرثار كمصدر خزن مرن يتفاعل مع التغيرات البيئية والقرارات الإدارية، مما يفرض ضرورة دمج هذه المؤشرات في خطط إدارة الموارد المائية الوطنية.

جدول (4) تغير مساحة بحيرة الثرثار للمدة (1985 - 2025)

السنة	المساحة كم ²	النسبة المئوية %
1985	2234.19	12.8
1990	2056.63	11.8
1995	2397.64	13.8
2000	1663.72	9.6
2005	1965.62	11.3
2010	1718.23	9.9
1015	1656.48	9.5
2020	2199.57	12.7
2025	1495.01	8.6
المجموع التراكمي	17387.10	100

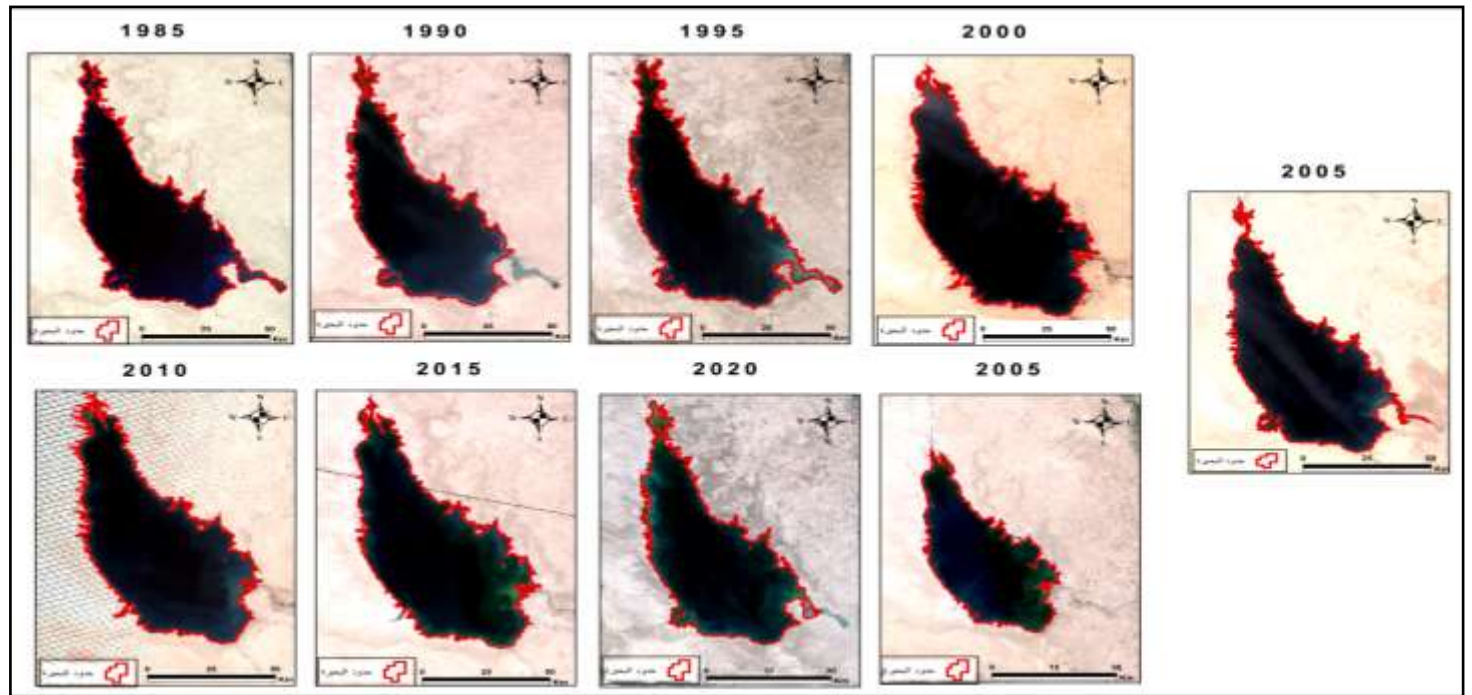
المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على النمذجة الخرائطية ومخرجات برنامج ArcGIS.

شكل (6) النسبة المئوية لمساحة بحيرة الثرثار للمدة (1985 - 20125)



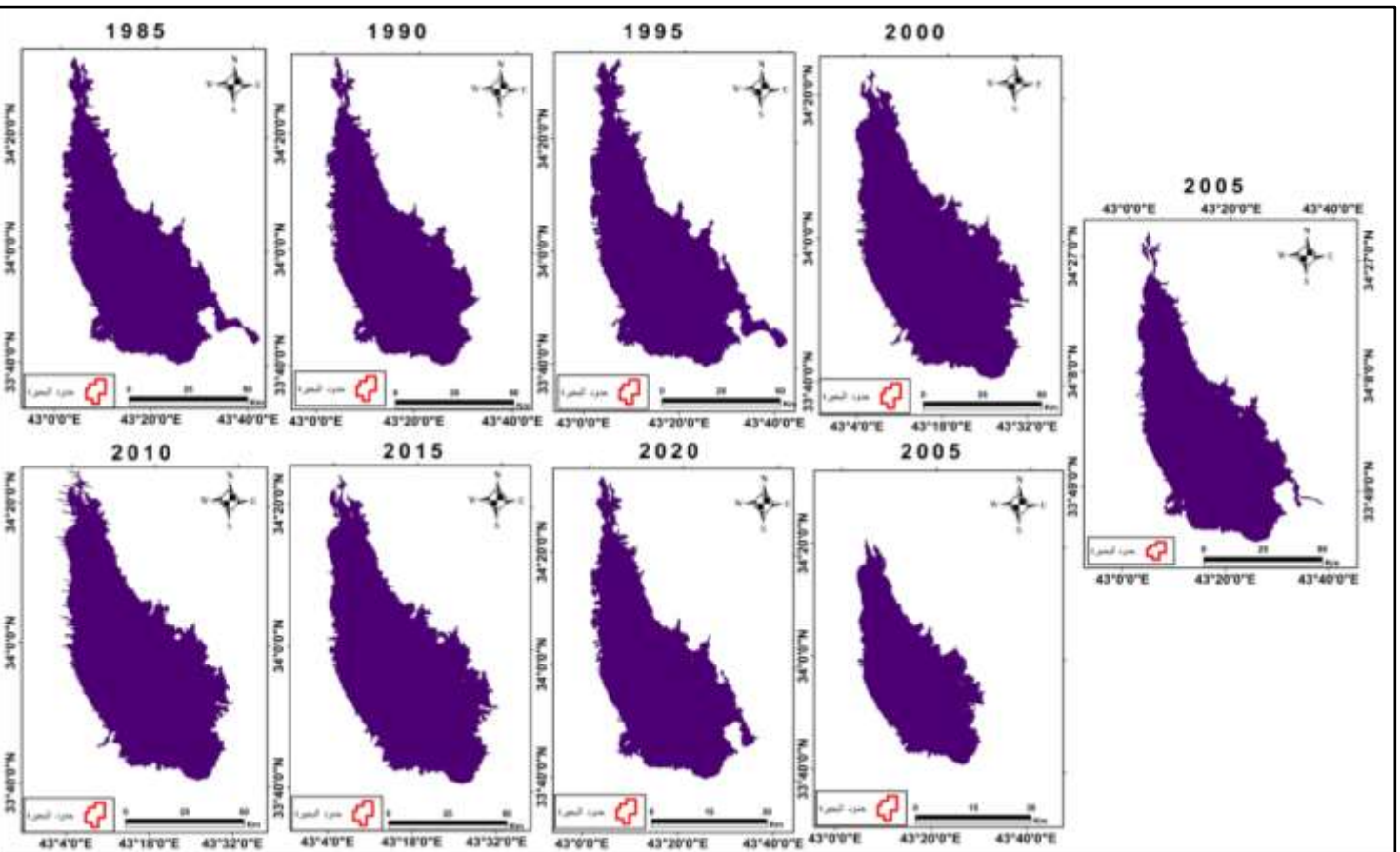
المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على جدول (4).

نماذج (2) مرئيات فضائية لتغير مساحة بحيرة الترنار للمدة 1985 - 2025



المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على مرئيات القمر الاصطناعي Landsat ومخرجات برنامج ArcGIS .

خريطة (3) النمذجة الخرائطية لتغير مساحة بحيرة الترنار للمدة 1985 - 2025



4-2 نمذجة تغير مساحة بحيرة سد الموصل:

يتضح من جدول (5) وشكل (7) نتائج نمذجة تغيرات المساحة السطحية لبحيرة سد الموصل خلال الفترة الممتدة من عام 1985 إلى عام 2025، يلاحظ وجود تباين واضح في التوزيع الزمني للمساحة، مما يعكس تفاعلاً مركباً بين العوامل المناخية والهيدرولوجية والتنظيمية. وقد مثلت هذه التغيرات انعكاساً دقيقاً للضغوط البيئية والمائية التي خضعت لها البحيرة خلال أربعة عقود. في عام 1985، سجلت أدنى مساحة سطحية للبحيرة، إذ بلغت (36.37 كم²)، أي ما يمثل (1.5%) فقط من مجموع المساحة الكلية التراكمية. ويعزى هذا الانخفاض إلى أن سد الموصل كان حديث التشغيل نسبياً خلال هذه الفترة، ومن المرجح أن عمليات تعبئة الخزان لم تكتمل بعد، إضافةً إلى احتمالية انخفاض واردات نهر دجلة أو اعتماد سياسة تعبئة تدريجية لأغراض المراقبة والضبط الفني. وبحلول عام 1990، ارتفعت مساحة البحيرة بشكل كبير إلى (355.09 كم²)، ما يعادل (15.0%) من الإجمالي، واستمر هذا المستوى في عام 1995 دون تغيير. ويشير هذا الثبات إلى بلوغ الخزان مرحلة الامتلاء شبه الكامل نتيجة استقرار التصارييف النهرية، وربما ارتفاع معدلات الأمطار أو ذوبان الثلوج في الحوض الأعلى، إلى جانب غياب أزمات مائية حادة خلال هذه الفترة. هذا الاستقرار يعكس كفاءة الإدارة المائية في تلك السنوات وتوازن عمليات الخزن والتفريغ. وفي عام 2000، تراجعت المساحة إلى (278.27 كم²)، بنسبة (11.8%)، وهو ما يعكس بداية تعرض المنطقة لتراجع مائي واضح. يحتمل أن هذا الانخفاض كان نتيجة لتغيرات مناخية وانخفاض في التصارييف السنوية، إضافةً إلى زيادة الضغط على البحيرة كمصدر لتغطية احتياجات الري والطاقة، خصوصاً مع اتساع الرقعة الزراعية في شمال العراق.

شهدت عام 2005 ارتفاعاً في المساحة إلى (335.00 كم²)، بنسبة (14.2%)، مما يدل على تحسن نسبي في الإمداد المائي أو اتباع سياسة خزن استباقية استعداداً لفصول الجفاف. إلا أن هذا الاتجاه لم يستمر، حيث سجلت عام 2010 تراجعاً طفيفاً إلى (274.86 كم²)، بنسبة (11.6%)، نتيجة لتذبذب معدلات الأمطار واستمرار استنزاف الخزن لأغراض توليد الطاقة أو سقي المحاصيل. في عام 2015، استقرت المساحة عند (276.51 كم²)، أي بنسبة (11.7%)، مما يدل على حالة توازن مؤقت بين عمليات الخزن والتصريف. أما في عام 2020، فقد ارتفعت المساحة إلى (309.30 كم²)، بنسبة (13.1%)، ويحتمل أن ذلك مرتبط بتحسّن نسبي في الإمدادات المائية نتيجة لذوبان الثلوج أو هطولات مطرية جيدة في حوض دجلة الأعلى، إضافةً إلى قلة الطلب النسبي على المياه مقارنة بالسنوات السابقة.

أما في عام 2025، فتظهر النمذجة تراجعاً حاداً في المساحة السطحية للبحيرة إلى (141.47 كم²)، ما يمثل فقط (6.0%) من الإجمالي، وهو ما يعد مؤشراً خطيراً على دخول البحيرة مرحلة ضغط مائي حاد، نتيجة انخفاض واردات نهر دجلة بشكل كبير بسبب المشاريع المائية في دول المنبع، إلى جانب زيادة الطلب المحلي على المياه وتكرار موجات الجفاف الإقليمي. خريطة (4).

وبتحليل المجموع التراكمي للمساحات خلال الفترة الزمنية، نجد أن المساحة الكلية بلغت (2361.96 كم²)، تمثل النسبة المرجعية الكاملة (100%). ويظهر هذا التوزيع الزمني تذبذباً ملحوظاً بين الحدين الأدنى والأقصى، ما يبرز حساسية

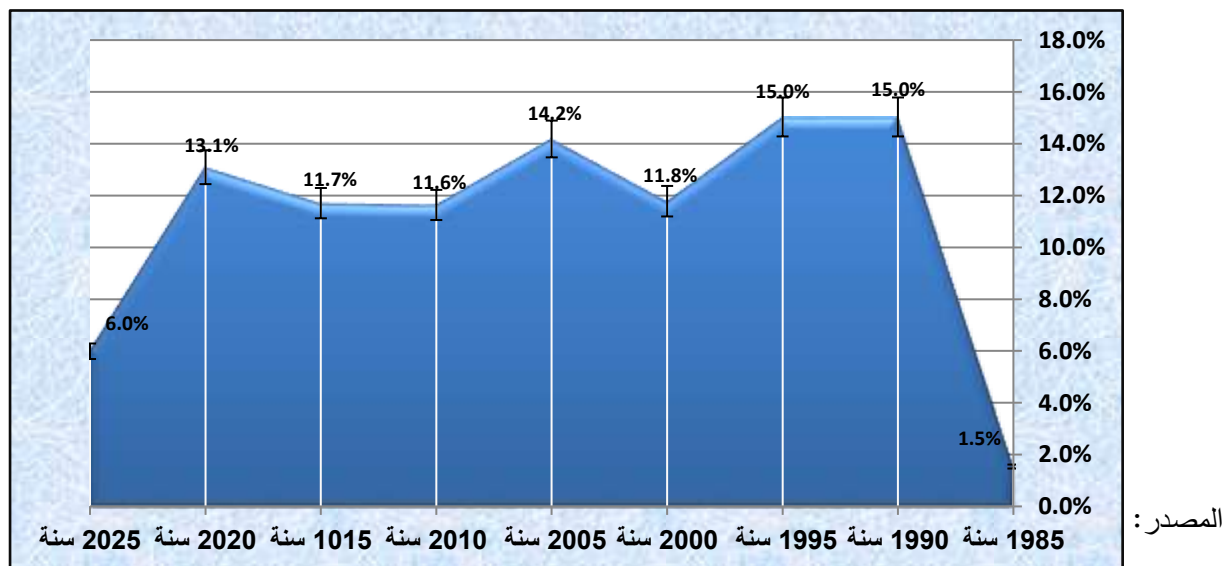
بحيرة سد الموصل العالية للتغيرات الهيدرولوجية، ويؤكد ضرورة تبني استراتيجية إدارة تكيفية قائمة على توقعات مناخية دقيقة ونماذج تشغيل مرنة، لضمان استدامة هذا المورد المائي الاستراتيجي في ظل التحديات المائية الإقليمية المتصاعدة.

جدول (5) تغير مساحة بحيرة سد الموصل للمدة (1985 - 2025)

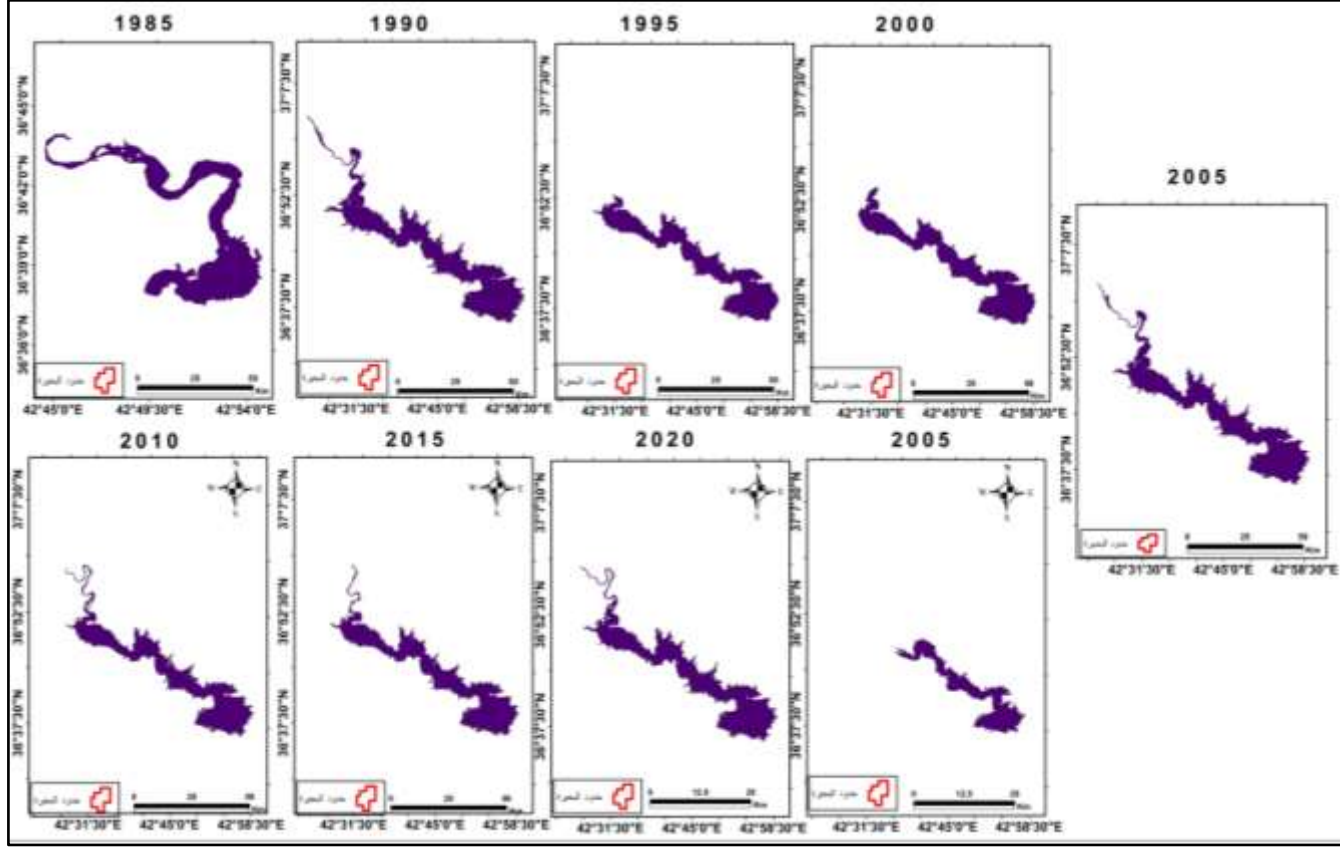
السنة	المساحة كم ²	النسبة المئوية %
1985	36.37	1.5
1990	355.09	15.0
1995	355.09	15.0
2000	278.27	11.8
2005	335.00	14.2
2010	274.86	11.6
2015	276.51	11.7
2020	309.30	13.1
2025	141.47	6.0
المجموع التراكمي	2361.96	100

المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على النمذجة الخرائطية ومخرجات برنامج ArcGIS.

شكل (7) النسبة المئوية لمساحة بحيرة الثرثار للمدة (1985 - 2025)



خريطة (4) النمذجة الخرائطية لتغير مساحة بحيرة سد الموصل للمدة 1985 - 2025



المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على مرئيات القمر الاصطناعي Landsat ومخرجات برنامج ArcGIS .

5- التوقعات المستقبلية لتغير مساحة البحيرات باستخدام النمذجة المكانية (CA-Markov):

يعد نموذج (CA-Markov) من النماذج المكانية الزمنية المتقدمة التي تستخدم على نطاق واسع في دراسة التغيرات البيئية والتنبؤ بها، خاصة في ما يتعلق بتطور المساحات الأرضية والمائية اعتماداً على بيانات تاريخية مستخلصة من صور الأقمار الصناعية. يجمع النموذج بين سلسلة ماركوف (Markov Chain) التي تستخدم لحساب احتمالات انتقال فئة مكانية (مثل الماء أو اليابسة) من حالة إلى أخرى عبر الزمن، والخلايا الآلية (Cellular Automata) التي تراعي التأثيرات المكانية المحيطة بالخلايا، مما يسمح بإنتاج خرائط مستقبلية تعكس أنماط التغير بطريقة أكثر واقعية⁽¹³⁾.

يطبق هذا النموذج ضمن بيئة برنامج (TerrSet)، المتخصص في نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد، من خلال وحدة تحليل تعرف بـ (Land Change Modeler (LCM)). ويعتمد التطبيق العملي على إدخال خرائط الغطاء الأرضي أو المائي لفترات زمنية محددة - مثل أعوام 1985، 2000، و2025 - حيث يجري البرنامج تحليلاً للتغيرات الحاصلة، ثم يولد خريطة متوقعة لمساحة المسطحات المائية في سنة مستقبلية مثل 2030 أو 2040، مع إبراز المناطق المتوقعة أن تشهد توسعاً أو انكماشاً⁽¹⁴⁾.

وعند تطبيق النموذج على بحيرتي التراث وسد الموصل، تظهر فائدته في تتبع وتحليل التغيرات التي طرأت على المساحة المائية لكل منهما، والتنبؤ باتجاهاتها المستقبلية. فبحيرة التراث، الواقعة في منطقة ذات مناخ جاف ومعدلات تبخر مرتفعة، تتأثر سلباً بتذبذب إمدادات المياه، مما يجعلها مرشحة لمزيد من الانكماش في حال استمرار الظروف الحالية. أما بحيرة سد الموصل، وهي خزان مائي صناعي كبير، فتعد أكثر استقراراً نسبياً، لكنها لا تزال عرضة لتقلبات مرتبطة بإدارة الخزن والسياسات المائية الإقليمية⁽¹⁵⁾.

يسهم النموذج، من خلال مخرجاته المكانية الدقيقة، في تقديم رؤية مستقبلية علمية تساعد صناع القرار في تخطيط إدارة فعالة للموارد المائية، من خلال التعرف المبكر على مناطق الخطر، ووضع استراتيجيات للتقليل من آثار الجفاف أو فقدان المساحات المائية، مما يعزز من فرص تحقيق أمن مائي مستدام في العراق، خاصة في ظل التغيرات المناخية والتحديات المائية الإقليمية المتزايدة⁽¹⁶⁾.

5-1 خطوات تطبيق النموذج (CA-Markov):

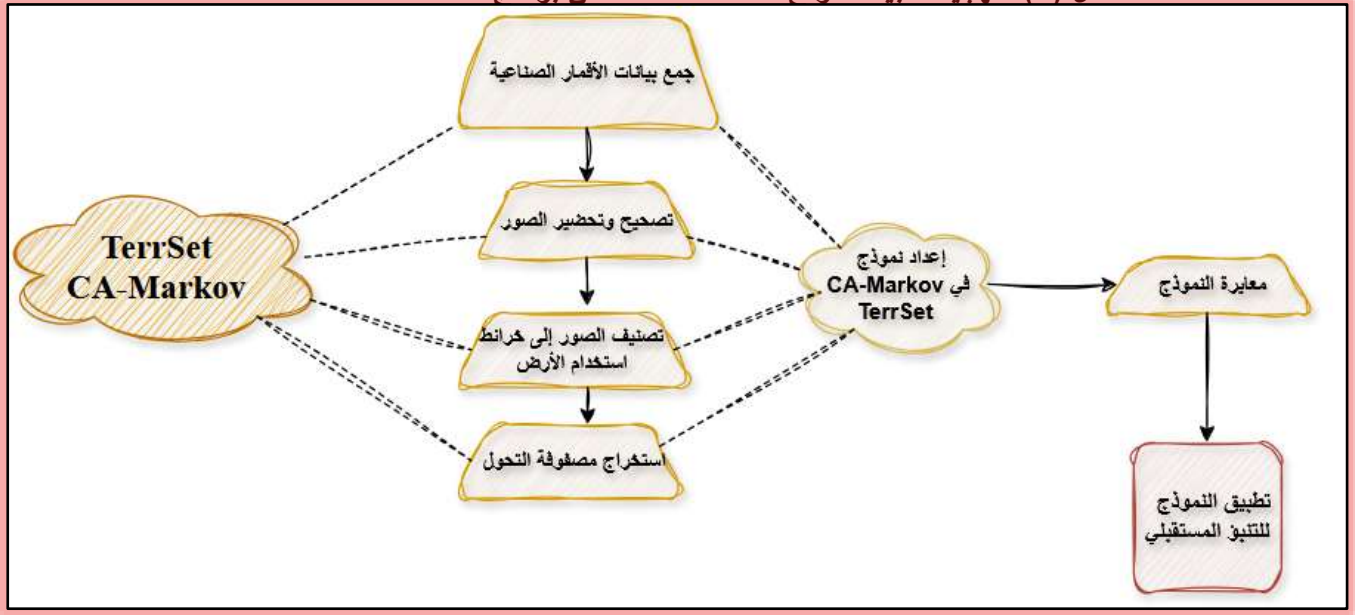
تم العمل على استخدام نموذج CA-Markov داخل برنامج TerrSet بهدف التنبؤ بالتغيرات المستقبلية في مساحة بحيرتي التراث وسد الموصل لعامي 2030 و2040. شملت آلية العمل مجموعة من الخطوات المنهجية، شكل (8) التي بدأت بجمع بيانات الأقمار الصناعية من نوع Landsat لمجموعة من السنوات (1985، 1990، 1995، 2000، 2010، 2015، 2020، 2025)، وذلك لتكوين سلسلة زمنية تمثل تطور المسطحات المائية في المنطقتين المدروستين. تم بعد ذلك إجراء المعالجة المسبقة لهذه الصور، والتي تضمنت تصحيح الانحرافات الهندسية والإشعاعية، وقص الصور لتشمل فقط منطقة الدراسة، بالإضافة إلى تطبيق المؤشرات الطيفية المناسبة لاستخراج المسطحات المائية، مثل مؤشر الفرق المائي الطبيعي NDWI.

بعد ذلك تم تنفيذ عملية تصنيف الموجة (Supervised Classification) للمربعات بهدف تمييز فئات الغطاء الأرضي، وخصوصاً فئة المسطحات المائية، والتي أعيد تصنيفها لاحقاً إلى طبقات ثنائية (ماء = 1، غير ماء = 0) لسهولة إدخالها في نموذج CA-Markov. بعد تحضير الطبقات المصنفة، تم الانتقال إلى وحدة Markov Chain Analysis داخل برنامج TerrSet، حيث تم إدخال خريطين متتاليتين مصنفتين (خريطين عامي 1985 و2025) ليقوم البرنامج بحساب مصفوفة احتمالات الانتقال (Transition Probability Matrix)، بالإضافة إلى خريطة الانتقال المكاني (Transition Area Map)، شكل (9).

تم بعد ذلك تشغيل نموذج CA-Markov والتي تجمع بين خصائص سلسلة ماركوف (Markov) والتحليل المكاني بواسطة الخلايا الخلوية (Cellular Automata) لإنشاء خرائط التنبؤ المستقبلية. حيث تم إدخال آخر خريطة مصنفة (عام 2025)، إلى جانب خريطة احتمالات الانتقال وخريطة القيود، مع تحديد فترة التنبؤ بخمسة سنوات للحصول على خريطة عام 2030، وخمسة عشر سنة للحصول على خريطة عام 2040. ومن خلال هذه الوحدة، تم إنتاج خرائط تعكس الشكل المتوقع لتوزيع المسطحات المائية في البحيرتين مستقبلاً. شكل (10).

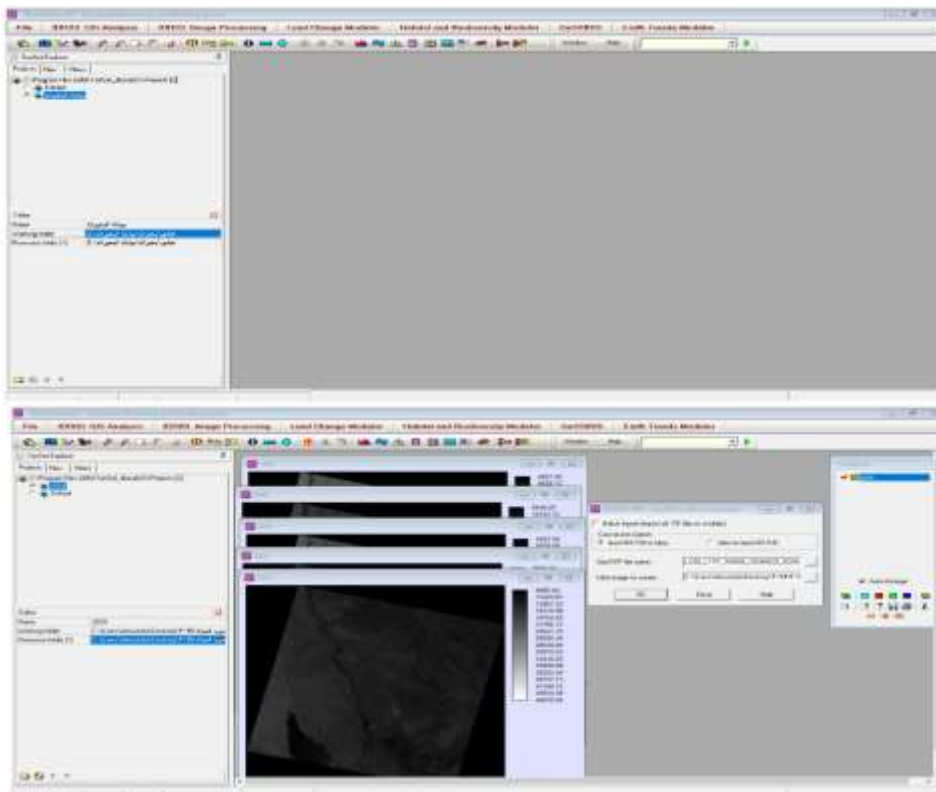
بعد إنتاج الخرائط المستقبلية، تم استخدام أدوات التحليل الإحصائي داخل البرنامج وأيضاً في برامج نظم المعلومات الجغرافية مثل ArcGIS لحساب إجمالي المساحات التي تغطيها المياه في كل من الخرائط الناتجة.

شكل (8) منهجية تطبيقية نموذج CA-Markov في برنامج TerrSet



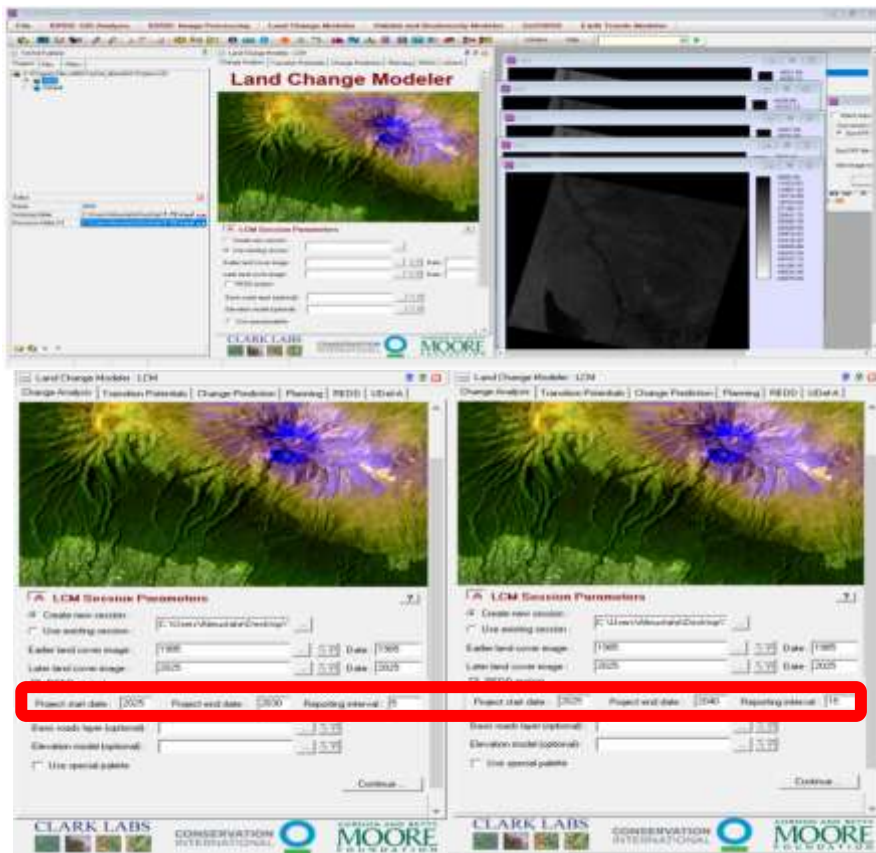
المصدر: من عمل الباحث.

شكل (9) برنامج TerrSet



المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على نموذج CA-Markov في برنامج TerrSet.

شكل (10) آلية تطبيق نموذج CA-Markov في برنامج TerrSet



المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على نموذج CA-Markov في برنامج TerrSet.

5-2 تنبؤ بالتغيرات في مساحة بحيرتي الثرثار وسد الموصل باستخدام نموذج CA-Markov:

يتضح من جدول (6) وشكل (11) نتائج النمذجة الخرائطية للتغيرات المتوقعة في المساحات المائية لكل من بحيرتي الثرثار وسد الموصل خلال العقدين القادمين، وذلك بالاعتماد على تقنيات الاستشعار عن بعد ونموذج CA-Markov. وتشير التنبؤات إلى أن مساحة بحيرة الثرثار ستبلغ في عام 2030 حوالي 1343.93 كم²، وهو ما يمثل 52.4% من المساحة الكلية المتوقعة. إلا أن هذه المساحة مرشحة للتراجع بحلول عام 2040 إلى 1222.15 كم²، أي بنسبة 47.6%، ما يعكس انخفاضاً قدره 121.78 كم² خلال عشر سنوات. خريطة (6)، ويلاحظ من هذه القيم وجود اتجاه تناقص تدريجي في مساحة البحيرة بين عامي 2030 و2040، ويعزى هذا الانخفاض في المقام الأول إلى الارتفاع المستمر في درجات الحرارة، والذي يؤدي بدوره إلى زيادة معدلات التبخر، خصوصاً خلال فصل الصيف، مما يقلل من كميات المياه السطحية المخزنة. كما أن البحيرة تعتمد بشكل كبير على واردات مائية محدودة من نهري دجلة والفرات، وهي واردات شهدت تراجعاً ملحوظاً بسبب بناء السدود في دول المنبع، الأمر الذي شكل ضغطاً إضافياً على التوازن المائي للبحيرة.

يضاف إلى ذلك تراكم الترسيبات الطينية داخل الحوض، والتي تسهم في تقليل العمق وتقليص السعة التخزينية للبحيرة، فضلاً عن الاستخدام العشوائي للمياه لأغراض الري في المناطق المحيطة، مما يضعف من كميات المياه المتاحة للتخزين. كما أن ضعف صيانة قنوات التغذية وعدم كفاءتها في نقل المياه يسهمان في خفض الفاعلية الهيدروليكية للنظام المائي المتكامل.

أما بالنسبة لبحيرة سد الموصل، فتظهر التنبؤات أن مساحتها ستبلغ في عام 2030 نحو 106.97 كم²، أي بنسبة 61.2% من المساحة المحتملة، لتتخفض بشكل حاد في عام 2040 إلى 67.82 كم²، ما يعادل 38.8% فقط. ويعد هذا التراجع كبيراً مقارنة ببحيرة الثرثار، حيث يصل الفارق إلى أكثر من 39 كم² خلال نفس الفترة. خريطة (7)، ويعزى هذا الانخفاض الحاد إلى مجموعة من العوامل المترابطة، أبرزها الإدارة التشغيلية للسد التي تركز غالباً على توليد الطاقة الكهربائية، مما يجعل التصريفات المائية تتبع احتياجات الإنتاج الكهربائي، أكثر من توجهه نحو الحفاظ على استقرار مستويات التخزين المائي. كما أن المنطقة الشمالية للعراق، والتي تحتضن هذه البحيرة، أصبحت أكثر عرضة للتغيرات المناخية القاسية، إذ تشهد شتاءً أقل غزارة من حيث الأمطار والثلوج، يقابله صيف طويل وجاف، مما يقلل من معدلات الجريان السطحي المغذي للبحيرة. يضاف إلى ذلك وجود نشاط زلزالي في المنطقة المحيطة بسد الموصل، ما يثير مخاوف متكررة بشأن السلامة الإنشائية والقدرة التخزينية الآمنة للبحيرة، وهو ما قد يدفع الجهات المعنية إلى خفض كميات المياه المخزنة لأسباب احترازية.

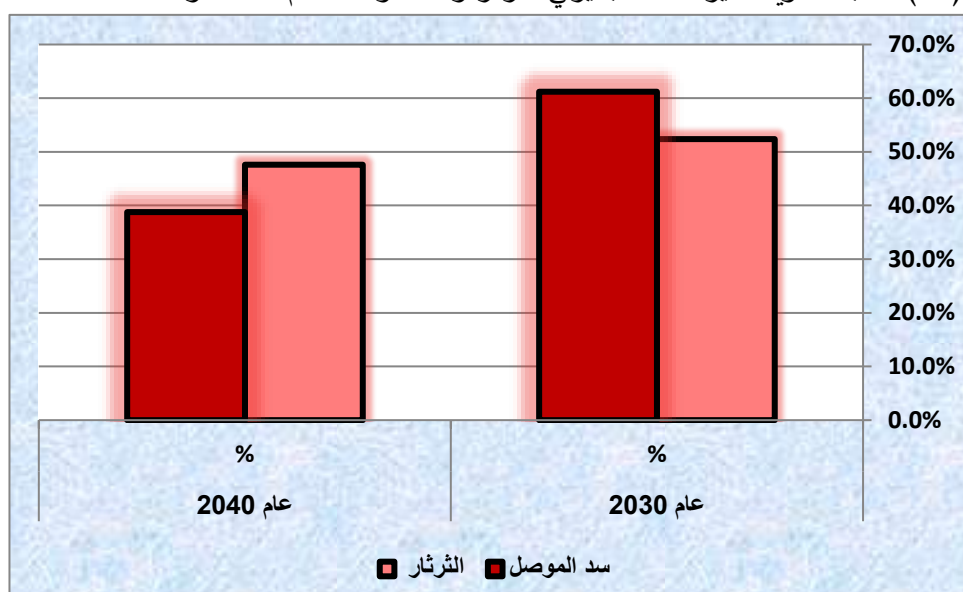
بشكل عام، يظهر الجدول أن كلا البحيرتين تتجهان نحو تراجع ملحوظ في المساحة المائية، وهو ما ينذر بتحديات بيئية واقتصادية جسيمة في المستقبل. وتؤكد هذه النتائج على أهمية دمج النمذجة البيئية في خطط إدارة الموارد المائية، والعمل على رفع كفاءة استخدام المياه، فضلاً عن المراقبة الدورية للتغيرات باستخدام تقنيات الاستشعار عن بعد والنمذجة المستقبلية، لضمان استدامة الموارد المائية في العراق.

شكل (6) تنبؤ بمساحة بحيرتي الثرثار وسد الموصل لعام 2030 و 2040

بحيرة	عام 2030		عام 2040	
	المساحة كم ²	%	المساحة كم ²	%
الثرثار	1343.93	52.4	1222.15	47.6
سد الموصل	106.97	61.2	67.82	38.8

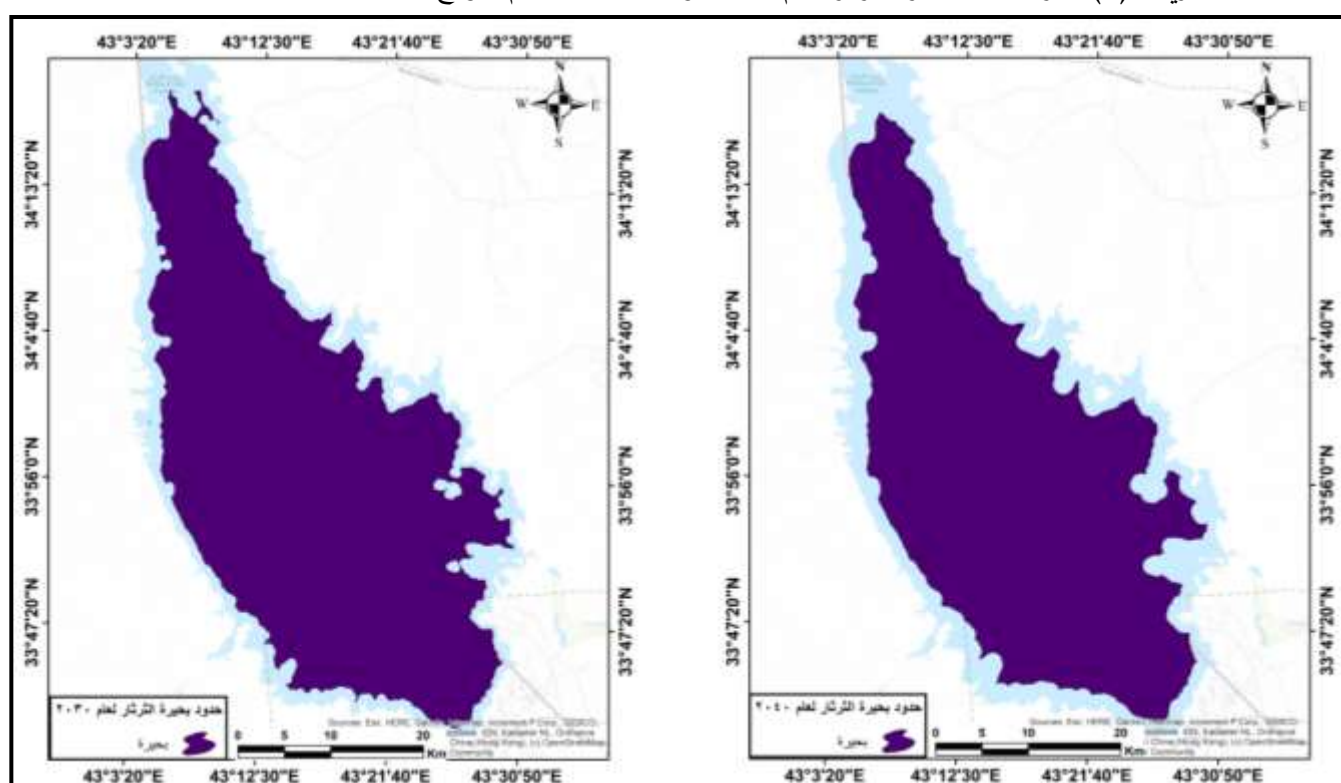
المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على خريطة (٨).

شكل (11) النسبة المئوية لتغير مساحة بحيرتي التراث وسد الموصل لعام 2030 و 2040

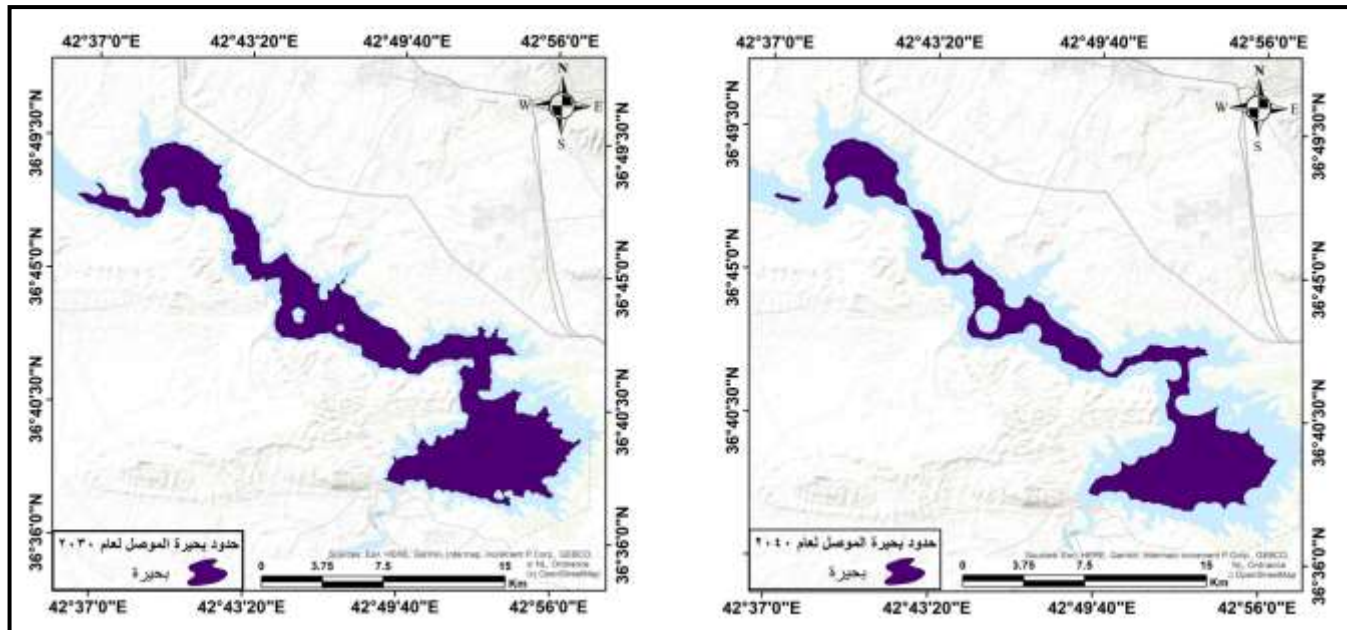


المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على جدول (6).

خريطة (6) تغير مساحة بحيرة التراث لعام 2030 و 2040 باستخدام نموذج CA-Markov



المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على نموذج CA-Markov في برنامج TerrSet ومخرجات برنامج ArcGIS.
خريطة (7) تغير مساحة بحيرة سد الموصل لعام 2030 و 2040 باستخدام نموذج CA-Markov



المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على نموذج CA-Markov في برنامج TerrSet ومخرجات برنامج ArcGIS.

الاستنتاجات:

- 1- أثبتت المؤشرات الطيفية فعاليتها العالية في رصد وتمييز المسطحات المائية، نظراً لاعتمادها على الخصائص الطيفية الفريدة للماء، ولا سيما الامتصاص العالي في الأطوال الموجية القريبة من تحت الحمراء (NIR) والانعكاس في الأطوال الموجية المرئية، مما يجعلها أدوات دقيقة في تتبع التغيرات المائية على المدى الزمني
- 2- أثبت نموذج CA-Markov كفاءته في محاكاة وتحليل التغيرات الزمنية والمكانية في مساحة المسطحات المائية، حيث أظهر قدرة عالية على التنبؤ بالاتجاهات المستقبلية لانكماش أو توسع البحيرات وفقاً للأنماط السابقة.
- 3- أظهرت نتائج النمذجة الخرائطية لمساحة بحيرة الثرثار تذبذباً واضحاً في مساحتها المائية بين عامي 1985 و 2025، حيث بلغت أعلى مساحة لها 2397.64 كم² عام 1995 (13.8%)، وأدنى مساحة 1495.01 كم² عام 2025 (8.6%)، نتيجة لتأثيرات مناخية وهيدرولوجية وبشرية متداخلة.
- 4- كما أظهرت النتائج أن بحيرة سد الموصل تعرضت لتذبذب ملحوظ في مساحتها السطحية خلال الفترة نفسها، حيث بلغت أدنى مساحة لها 36.37 كم² عام 1985 (1.5%) نتيجة بدء تعبئة الخزان، بينما سجلت أعلى مساحة 355.09 كم² في عامي 1990 و 1995 (15.0%) نتيجة استقرار التصارييف وامتلاء السد. وقد عادت المساحة للانخفاض في السنوات اللاحقة، لتصل وفق التقديرات المستقبلية إلى 141.47 كم² عام 2025 (6.0%)، ما يعكس تأثيراً متزايداً للعوامل المناخية، ونقص الإمدادات المائية من نهر دجلة، إضافة إلى الضغط البشري المتزايد على موارد المياه.

5- أظهرت نتائج التنبؤ للعامين 2030 و 2040 استمرار الاتجاه نحو الانحسار المائي في حال بقاء الظروف الحالية دون تدخلات إدارية أو تخطيطية فعالة، مما يندرج بتأثيرات بيئية واقتصادية على المدى البعيد.

التوصيات:

- 1- ضرورة اعتماد النماذج المكانية الزمانية في إدارة الموارد المائية، ولا سيما نموذج CA-Markov الذي أثبت كفاءته في التنبؤ باتجاهات التغير في المساحات المائية، مما يسهم في تحسين التخطيط المسبق لمواجهة مخاطر الجفاف أو الفيضانات.
- 2- دمج نتائج النمذجة الخرائطية في استراتيجيات إدارة المياه الوطنية، خاصةً عند رسم سياسات تخص البحيرات والسدود الكبرى، من خلال إدخال التغيرات المستقبلية في حسابات التوزيع المائي والاحتياجات الزراعية.
- 3- تحديث قاعدة البيانات المكانية والزمانية للمساحات المائية بصورة دورية، باستخدام صور الأقمار الصناعية عالية الدقة، مما يتيح رصد التغيرات في وقتها الحقيقي وتحسين دقة النماذج التنبؤية.
- 4- توسيع نطاق الدراسات لتشمل بحيرات وسدود أخرى في العراق مثل بحيرة الحبانية، بحيرة الرزازة، وسد حديثة، لتكوين تصور أشمل عن وضع الموارد المائية في البلاد باستخدام المنهج نفسه.
- 5- تشجيع البحوث متعددة التخصصات التي توظف الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية (GIS) في تحليل وإدارة الموارد الطبيعية، وذلك من خلال دعم البرامج البحثية والتعاون بين الجامعات والهيئات الحكومية.
- 6- استخدام النتائج التنبؤية كأداة تحذيرية مبكرة تساعد صناع القرار في وضع خطط استباقية لمواجهة آثار انخفاض المياه، كتقنين استخدام المياه، وتحسين كفاءة الري، واستحداث بدائل مائية مستدامة.
- 7- توصية بإنشاء مرصد وطني رقمي لتغيرات المساحات المائية في العراق، يرتبط ببيانات الأقمار الصناعية والنمذجة المكانية، ويستخدم كمنصة علمية لصنع القرار وتحديث المعلومات البيئية والمناخية.

- (1) Congalton, R. G., & Green, K. (2019). *Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices* (3rd ed.). CRC Press.
- (2) Jensen, J. R. (2007). *Remote sensing of the environment: An earth resource perspective* (2nd ed.). Pearson Prentice Hall.
- (3) Wulder, M. A., Masek, J. G., Cohen, W. B., Loveland, T. R., & Woodcock, C. E. (2012). Opening the archive: How free data has enabled the science and monitoring promise of Landsat. *Remote Sensing of Environment*, 122, 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.01.010>
- (4) Roy, D. P., Wulder, M. A., Loveland, T. R., Woodcock, C. E., Allen, R. G., Anderson, M. C., ... & Zhu, Z. (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*, 145, 154–172. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.001>
- (5) Miller, J. R., & Miller, M. E. (2005). Remote sensing of rivers and riparian corridors: Applications and opportunities. *Remote Sensing of Environment*, 87(2–3), 127–142. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.08.002>
- (6) Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
- (7) Hussain, M., Chen, D., Cheng, A., Wei, H., & Stanley, D. (2013). Change detection from remotely sensed images: From pixel-based to object-based approaches. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 80, 91–106. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.03.006>
- (8) Panigrahy, S., Deo, R. C., & Dadhwal, V. K. (2007). Water body extraction and change detection using remote sensing data and GIS. *Journal of Indian Society of Remote Sensing*, 35(1), 33–42. <https://doi.org/10.1007/BF02990716>
- (9) Roy, D. P., Wulder, M. A., Loveland, T. R., Woodcock, C. E., Allen, R. G., Anderson, M. C., ... & Zhu, Z. (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*, 145, 154–172. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.001>
- (10) Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
- (11) Wulder, M. A., Masek, J. G., Cohen, W. B., Loveland, T. R., & Woodcock, C. E. (2012). Opening the archive: How free data has enabled the science and monitoring promise of Landsat. *Remote Sensing of Environment*, 122, 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.01.010>
- (12) Weng, Q. (2012). *Remote sensing and GIS integration: Theories, methods, and applications*. McGraw-Hill.

-
- (13) Li, X., & Yeh, A. G.-O. (2002). Neural-network-based cellular automata for simulating multiple land use changes using GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 16(4), 323–343. <https://doi.org/10.1080/13658810210137003>
- (14) Pontius, R. G., & Malanson, J. (2005). Comparison of the Land Change Modeler and the cellular automata–Markov model for simulating land cover change. *Transactions in GIS*, 9(1), 5–27. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2005.00205.x>
- (15) Sedghamiz, G., Mahdianpari, M., Salehi, B., & Homayouni, S. M. (2018). Land use change prediction using CA-Markov model and remote sensing data: A case study of the Ramsar wetlands. *Ecological Informatics*, 44, 44–54. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2018.06.008>
- (16) Tahmasebi, P., Liaghat, S., & Heidari, A. (2019). Land use/land cover change detection and prediction using remote sensing data and CA-Markov model. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(3), 160. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7276-2>