

النمذجة الهيدرولوجية لأنماط التغيرات الديناميكية للمياه السطحية لبحيرة

دربندخان وأثارها البيئية

م.د. كلجان خليل مجيد قنبر

جامعة تكريت - كلية التربية للعلوم الانسانية - قسم الجغرافية

Hydrological Modeling of Dynamic Change Patterns in the Surface Waters of Lake Darbandikhan and Their Environmental Impacts

Kaljan.k.majeed@tu.edu.iq

ملخص:

تسعى هذه الدراسة إلى توظيف النمذجة الهيدرولوجية لرصد ومتابعة التغيرات الحاصلة في ديناميكية المياه السطحية لبحيرة دربندخان وتحليل انعكاساتها البيئية. وتكتسب البحيرة أهمية استراتيجية بوصفها أحد الموارد المائية الحيوية في إقليم كردستان العراق، إذ تؤدي دوراً محورياً في تلبية احتياجات الزراعة ومياه الشرب وتوليد الطاقة الكهرومائية، فضلاً عن كونها موئلاً رئيسياً للتنوع الأحيائي. استخدمت الدراسة بيانات الأقمار الاصطناعية Landsat-8 المزودة بالمتحسس OLI لرصد التغيرات التاريخية في مستويات البحيرة خلال الفترة من 1990 إلى 2025. كما جرى اعتماد نموذج CA-Markov ضمن بيئة برنامج TerrSet للتنبؤ بالتغيرات المستقبلية المتوقعة في حجم البحيرة خلال عامي 2030 و 2040، مع تقييم الآثار البيئية المصاحبة لهذه التحولات. أظهرت النتائج أن بحيرة دربندخان تشهد تذبذباً واضحاً في مساحتها المائية بين عامي 1985 و 2025، إذ ارتفعت بنسبة (+26%) عام 1990، ثم انخفضت (-19.9%) عام 1995، وبلغت أدنى مستوى لها عام 2005 (-10.9%)، قبل أن تتحسن (+34.9%) عام 2010 و (+54.3%) عام 2015، لتتراجع مجدداً (-14.7%) عام 2020 مع ارتفاع طفيف (+2.7%) عام 2025. ما يعكس تذبذباً ناتجاً عن تفاعل العوامل المناخية والهيدرولوجية والبشرية. كما بينت النتائج أن بحيرة دربندخان تواصل تراجعها المستقبلي بحسب نموذج (CA-Markov)، إذ يتوقع انخفاض مساحتها من 67.58 كم² (51.93%) عام 2030 إلى 35.94 كم² (27.62%) عام 2040، مما يؤكد أن التغير المتوقع هو استمرارية زمنية لواقع الزهن وليس تحولاً مفاجئاً في سلوك النظام المائي للبحيرة. الكلمات المفتاحية: النمذجة الهيدرولوجية، بحيرة دربندخان، الأقمار الاصطناعية، Landsat-8 OLI، TerrSet CA-Markov، ديناميكية المياه السطحية، التغيرات البيئية.

Abstract:

This study aims to employ hydrological modeling to monitor and track changes in the surface water dynamics of Darbandikhan Lake and to analyze their environmental implications. The lake holds strategic importance as one of the vital water resources in the Kurdistan Region of Iraq, playing a central role in meeting agricultural, drinking water, and hydropower needs, in addition to serving as a major habitat for biodiversity. The study utilized Landsat-8 satellite data equipped with the OLI sensor to observe historical changes in the lake's levels during the period from 1990 to 2025. Additionally, the CA-Markov model was applied within the TerrSet environment to predict future changes in the lake's volume for the years 2030 and 2040, along with an assessment of the associated environmental impacts. The results showed that Darbandikhan Lake experienced significant fluctuations in its water surface area between 1985 and 2025, with an increase of (+26%) in 1990, followed by a decrease of (-19.9%) in 1995, reaching its lowest level in 2005 (-10.9%), before improving by (+34.9%) in 2010 and (+54.3%) in 2015, then declining again by (-14.7%) in 2020 with a slight increase of (+2.7%) in 2025. These fluctuations reflect the interaction of climatic, hydrological, and human factors. Furthermore, the results indicate that Darbandikhan Lake will continue its future decline according to the CA-Markov model, with its area expected to decrease from 67.58 km² (51.93%) in 2030 to 35.94 km²

(27.62%) in 2035, and further to 26.62 km² (20.46%) in 2040. This ongoing reduction represents a natural continuation of the current climatic and hydrological conditions, confirming that the projected changes are a temporal continuity of the current reality rather than a sudden shift in the lake's water system. **Keywords:** Hydrological Modeling, Lake Darbandikhan, Satellites, Landsat-8 OLI, TerrSet CA-Markov, Surface Water Dynamics, Environmental Changes.

المقدمة:

تعد النظم البيئية المائية من أكثر النظم حساسية للتغيرات الطبيعية والبشرية، إذ تشهد موارد المياه السطحية في العقود الأخيرة ضغوطاً متزايدة ناجمة عن التغيرات المناخية والأنشطة البشرية. وتعد البحيرات والخزانات المائية من أبرز البيئات التي تعكس هذه التغيرات، كونها تمثل مستودعات رئيسية للمياه العذبة وعناصر محورية في الدورة الهيدرولوجية. وفي هذا السياق تبرز بحيرة دربندخان، الواقعة في شمال شرقي العراق، كأحد أهم الخزانات المائية الاستراتيجية، إذ تلعب دوراً حيوياً في إمدادات المياه، والري، وتوليد الطاقة الكهرومائية، إضافةً إلى أهميتها البيئية في دعم التنوع الإحيائي. تشهد بحيرة دربندخان في السنوات الأخيرة تذبذبات ملحوظة في مستوياتها وديناميكياتها الهيدرولوجية بفعل تداخل عوامل طبيعية مثل التغيرات المطرية ودرجات الحرارة، وعوامل بشرية متمثلة في بناء السدود والتوسع في الاستغلال المائي. ويعد رصد هذه التغيرات وفهم آثارها البيئية خطوة جوهرية لضمان الإدارة المستدامة للموارد المائية. توفر النمذجة الهيدرولوجية إطاراً علمياً متقدماً لمحاكاة العمليات المائية وتحليل أنماط التغير في الخزانات والبحيرات. إذ تتيح هذه النماذج إمكانية رصد ديناميكية المياه السطحية من حيث التدفق، التبخر، التخزين، والتوزيع الزمني والمكاني، بما يساهم في الكشف عن مؤشرات الخطر المرتبطة بانخفاض مستويات المياه أو تدهور نوعيتها. ومن ثم، يمكن توظيف هذه النماذج في تقييم الآثار البيئية الناجمة عن هذه التغيرات، مثل تراجع الإنتاجية البيولوجية، اختلال التوازن البيئي، وزيادة مخاطر التلوث والترسيب. من هنا تأتي أهمية هذه الدراسة التي تسعى إلى توظيف النمذجة الهيدرولوجية لرصد ومراقبة أنماط التغيرات في ديناميكية المياه السطحية لبحيرة دربندخان، وتحديد انعكاساتها البيئية، بما يعزز من إمكانيات الإدارة المتكاملة للموارد المائية ويساهم في وضع استراتيجيات فعالة للتكيف مع التحديات المستقبلية.

مشكلة الدراسة:

تعاني بحيرة دربندخان من تغيرات ملحوظة في ديناميكية المياه السطحية نتيجة لتأثيرات طبيعية وبشرية، تشمل التغيرات المناخية، التذبذب في معدلات الهطول المطري، الجريان السطحي، إضافة إلى النشاطات البشرية مثل إدارة الموارد المائية والأنشطة الزراعية. هذه التغيرات أدت إلى اضطراب في التوازن الهيدرولوجي للبحيرة، مما انعكس على بيئتها المائية، التنوع الأحيائي، وجودة المياه. ورغم أهمية البحيرة كمورد مائي استراتيجي، لا تزال الدراسات المتعلقة برصد أنماط التغيرات الهيدرولوجية باستخدام النمذجة الرقمية محدودة، الأمر الذي يعيق القدرة على وضع خطط بيئية وإدارية فعالة للحد من الآثار السلبية. ومن هنا تبرز مشكلة الدراسة في (كيف يمكن توظيف النمذجة الهيدرولوجية لرصد ومراقبة أنماط التغيرات في ديناميكية المياه السطحية لبحيرة دربندخان وتقييم انعكاساتها البيئية؟).

فرضية الدراسة:

تقترض الدراسة أن استخدام النمذجة الهيدرولوجية سيساهم في توفير تمثيل دقيق وكمي للتغيرات في ديناميكية المياه السطحية لبحيرة دربندخان، بما يكشف عن العلاقات بين التغيرات المناخية والأنشطة البشرية من جهة، وبين التذبذب في مستويات المياه وجودتها من جهة أخرى، وبالتالي يمكن الاعتماد على نتائج هذه النمذجة لتقدير الآثار البيئية ووضع استراتيجيات للإدارة المستدامة للبحيرة.

أهداف الدراسة:

- ١- رصد وتحليل أنماط التغيرات في ديناميكية المياه السطحية لبحيرة دربندخان خلال فترة زمنية محددة باستخدام تقنيات النمذجة الهيدرولوجية.
- ٢- تقييم الآثار البيئية المترتبة على تلك التغيرات، مثل نوعية المياه، الترسيب، والتنوع الإحيائي.
- ٣- توظيف النمذجة الهيدرولوجية كأداة للتنبؤ المستقبلي بأنماط التغير في مستوى وحركة المياه السطحية، بما يساهم في وضع سيناريوهات للإدارة المستدامة للبحيرة.
- ٤- اقتراح استراتيجيات للإدارة المستدامة لبحيرة دربندخان اعتماداً على نتائج النمذجة والتحليل البيئي.

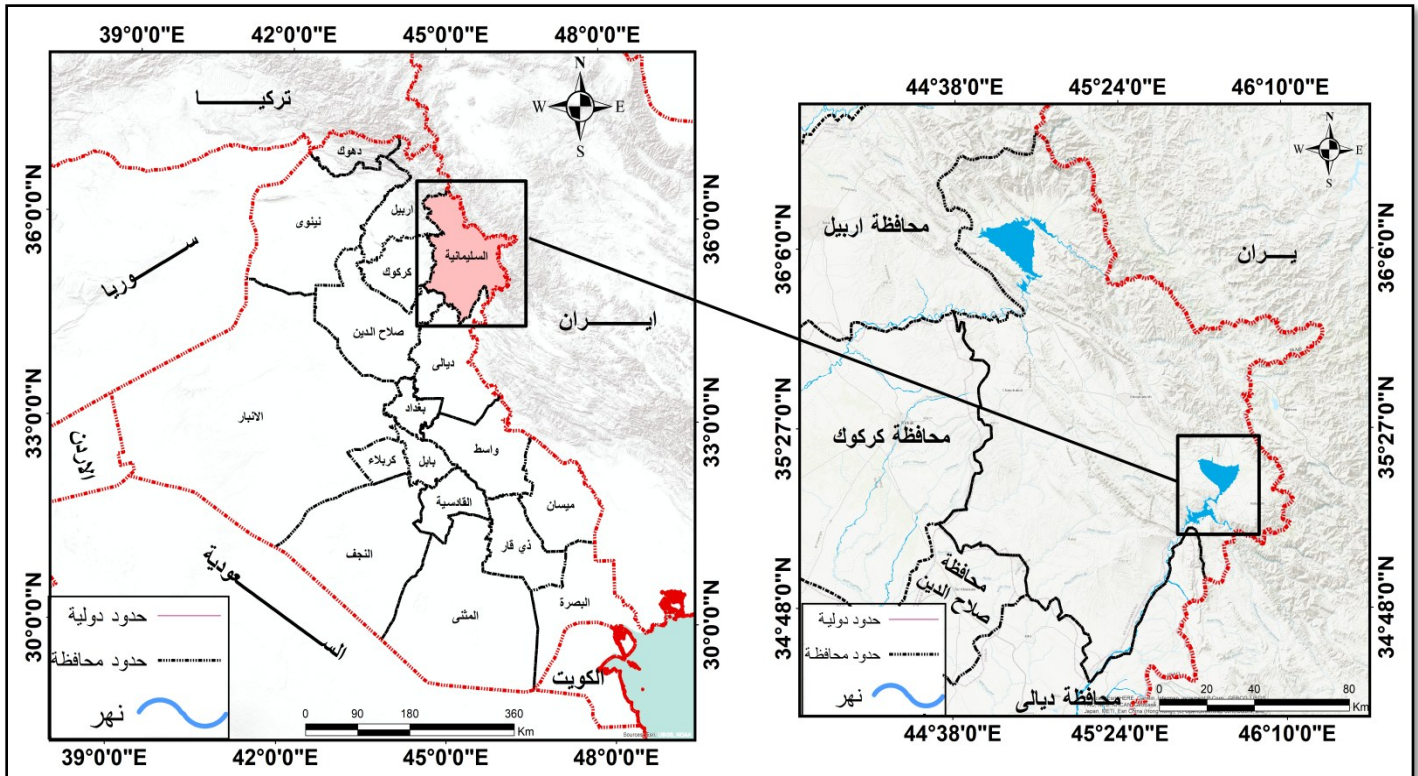
مناهج الدراسة:

تعتمد هذه الدراسة على مجموعة من المناهج التي تتلاءم مع طبيعتها البحثية، حيث يقوم المنهج الوصفي بدور أساسي في عرض الظواهر الهيدرولوجية والبيئية المرتبطة ببحيرة دربندخان وتفسير خصائصها العامة، في حين يستخدم المنهج التحليلي لمعالجة بيانات المياه السطحية ورصد التغيرات المناخية والأنشطة المؤثرة على البحيرة. كما يتيح المنهج الكمي توظيف المعادلات والنماذج الهيدرولوجية لقياس شدة التغيرات بدقة رقمية عالية، وإلى جانب ذلك، يعد المنهج النمذجي القائم على تقنيات نظم المعلومات الجغرافية (GIS) والاستشعار عن بعد أداة محورية في تصميم نموذج هيدرولوجي يحاكي أنماط التغيرات في ديناميكية المياه السطحية ويكشف عن انعكاساتها البيئية.

موقع منطقة الدراسة:

تقع بحيرة دربندخان في شمال شرق العراق، ضمن الحدود الإدارية لقضاء دربندخان التابع لمحافظة السليمانية، تمتد بين دائرتي عرض (٣٥° ٢١' ٠" - ٣٥° ٣٠' ٠") شمالاً، وخطي طول (٤٥° ٤٥' ٠" - ٤٦° ١٠' ٠") شرقاً تقريباً. تشغل البحيرة موقعاً استراتيجياً على نهر ديال (سيروان) الذي يعد أحد الروافد الرئيسية لنهر دجلة.

خريطة (١) موقع منطقة الدراسة



المصدر: من عمل الباحثة بالاعتماد على وزارة الموارد المائية، الهيئة العامة للمساحة خريطة العراق الادارية ، مقياس ١ : ١٠٠٠٠٠٠٠ لسنة ٢٠١٠.

مواد وطرق العمل

١- أنظمة الاستشعار عن بعد المخصصة لمراقبة البحيرات:

تعد منصات الاستشعار عن بعد من نوع لاندسات (Landsat) من أهم المصادر المجانية والدقيقة في رصد وتحليل التغيرات التي تطرأ على المسطحات المائية، مثل بحيرة دربندخان، لما تمتاز به من تغطية زمنية طويلة ودقة مكانية مناسبة. ومن بين هذه النسخ الثلاثة الأكثر استخداماً هي: Landsat 4-5 TM، وLandsat 7 ETM، وLandsat 8 OLI/TIRS، ولكل منها خصائص فنية تؤثر مباشرة في دقة تمثيل وتحليل ظواهر البحيرات.

• بدأ استخدام القمرين لاندسات ٤ و٥ المزودين بمستشعر *Thematic Mapper (TM)* منذ ثمانينيات القرن الماضي، وهما يحتويان على سبعة نطاقات طيفية تغطي المجال من الضوء المرئي إلى الأشعة تحت الحمراء القصيرة، إضافة إلى نطاق حراري واحد (NASA, 2022). وتمتاز بياناتهما بدقة مكانية تبلغ ٣٠ متراً في معظم النطاقات، ما يجعلها مناسبة لرصد امتداد سطح الماء في البحيرات الكبيرة والمتوسطة، مثل دربندخان، ورصد التغيرات الزمنية في المساحة المائية باستخدام مؤشرات مثل NDWI و MNDWI كما يمكن الاستفادة من النطاق الحراري في

تقدير درجة حرارة سطح الماء، رغم أن الدقة الحرارية (١٢٠ متر) تجعل النتائج تقريبية في المسطحات الصغيرة. ومع ذلك، وفرت هذه النسخ قاعدة زمنية طويلة مفيدة جداً لدراسة التغيرات التاريخية للبحيرات خلال العقود الماضية، شرط إجراء التصحيحات الإشعاعية والجوية اللازمة بسبب قدم أجهزة الاستشعار (Chander, & Helder, 2009).

• أما لاندسات ٧ الذي أطلق في عام ١٩٩٩ والمزود بمستشعر *Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)*، فقد مثل تطوراً مهماً عن سابقه بفضل إضافة القناة البانكروماتية (Panchromatic Band) بدقة ١٥ متراً، مما ساعد في تحسين التمييز المكاني لحدود البحيرات. كما تم تحسين دقة النطاق الحراري إلى ٦٠ متراً تقريباً، وهو ما زاد من موثوقية حساب درجة حرارة سطح الماء. إلا أن القمر تعرض عام ٢٠٠٣ إلى عطل في نظام تصحيح المسح (SLC-off)، ما تسبب في ظهور فجوات على شكل خطوط مفقودة في الصور بنسبة تصل إلى نحو ٢٢٪ من مساحة المشهد. ورغم ذلك، ما زالت بياناته ذات فائدة عالية في الدراسات المائية، خاصة إذا تم استخدام تقنيات ملء الفجوات (Gap Filling) أو دمج أكثر من مشهد لتكوين صورة مكتملة. ولذلك يمكن الاعتماد على لاندسات ٧ في الفترات اللاحقة لعام ٢٠٠٣ بشرط معالجة العيوب الناتجة عن العطل (USGS, 2023).

• جاء **Landsat - 8** الذي أطلق عام ٢٠١٣ والمزود بمستشعرين متطورين هما *Operational Land Imager (OLI)* و *Thermal Infrared Sensor (TIRS)*، ليحدث نقلة نوعية في دقة الرصد الطيفي والإشعاعي. فقد أصبحت القنوات الطيفية أكثر نقاءً وأضيق عرضاً، وتمت إضافة نطاق ساحلي (Coastal/Aerosol Band) يفيد في دراسة الخصائص البصرية للمياه الضحلة والعاكسة، كما تحسنت نسبة الإشارة إلى الضوضاء بشكل واضح. وتعد بياناته الأنسب حالياً لرصد المسطحات المائية مثل بحيرة دربندخان، إذ يمكن من خلالها حساب مؤشرات دقيقة لامتداد المياه (NDWI, MNDWI) من خلال القنوات الحرارية المزوجة بعد تطبيق التصحيحات الجوية والحرارية المناسبة (Lymburner, L. et al, 2016). بصورة عامة، يمكن القول إن تسلسل أقمار لاندسات من **TM** إلى **ETM+** ثم **OLI/TIRS** قد مثل تطوراً مستمراً في تحسين دقة التمييز الطيفي والإشعاعي والمكاني، الأمر الذي انعكس بشكل مباشر على دقة رصد وتفسير التغيرات في البحيرات جدول (١) وشكل (١). فبينما كانت نسخ لاندسات ٤ و ٥ مناسبة لبناء قاعدة زمنية طويلة، قدم لاندسات ٧ دقة مكانية محسنة، أما لاندسات ٨ فقد وفر أفضل تمثيل إشعاعي وطيبي لرصد نوعية وحرارة المياه. لذلك فإن الجمع بين بيانات هذه المنصات يتيح سلسلة زمنية متكاملة لرصد تطور بحيرة دربندخان عبر العقود الماضية وتحليل العوامل البيئية المؤثرة فيها بدقة عالية (Mishra, et al, 2014).

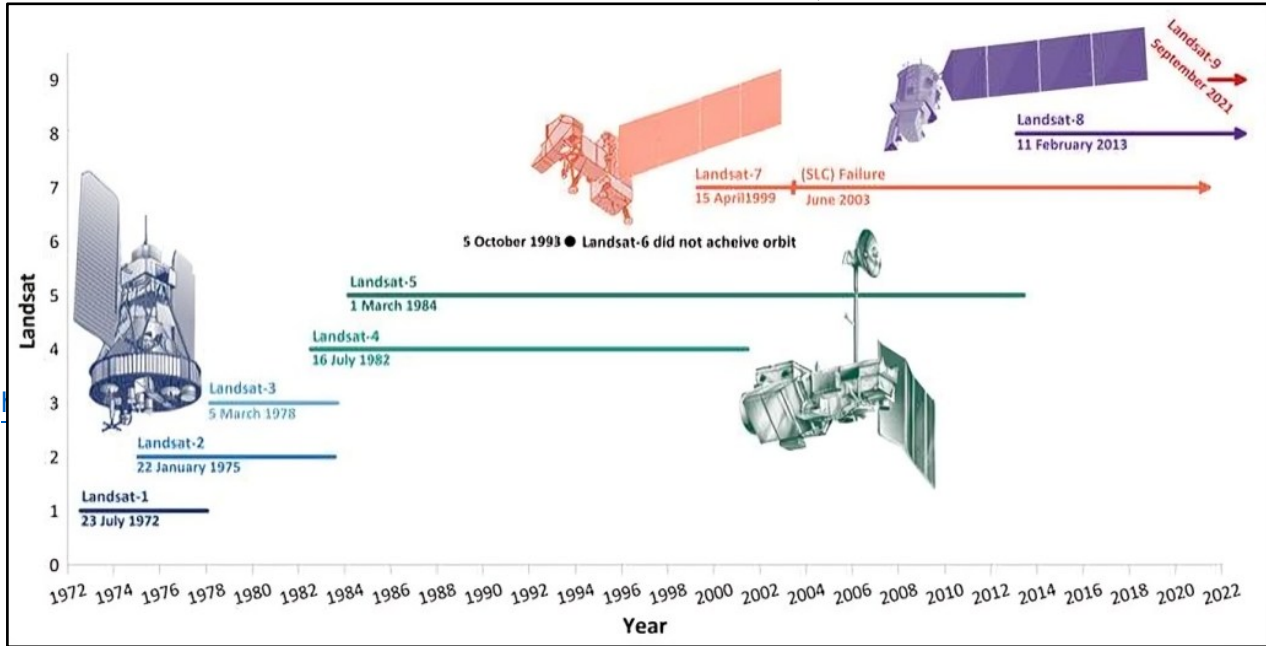
جدول (1) خصائص منصات لاندسات المستخدمة في مراقبة بحيرة دربندخان

القم ر ال صنا عي	Sensor نوع المتحسس	فترة الاستخ دام في الدراسة	الج يل	الدقة المكانية (متر)	فترة التكرار الزمني (يوم)	عدد النطا قات الطي فية	أهم التطبيقات في الدراسة
La nd sat 1	Multispectral Scanner (MSS)	1985	الج يل الأ ول	79 × 79	18	4	تتبع التغيرات التاريخية الأولية في مساحة البحيرة
La nd sat 4	Thematic Mapper (TM)	1990 - 1992	الج يل الثا ني	30 × 30	16	7	تحسين دقة التمييز الطيبي وإضافة نطاقات الأشعة تحت الحمراء القصيرة
La nd	Thematic Mapper (TM)	1992 - 2012	الج يل	30 × 30	16	7	أطول فترة تشغيل بين الأقمار، مراقبة الاتجاهات

الزمنية لتغيرات مساحة البحيرة	واستقرار إشعاعي عالٍ				الثا ني			sat 5
تحليل التفاصيل المكانية الدقيقة وحدود البحيرة	إضافة القناة البانكروماتية وتحسين الجودة الهندسية	8	16	30 × 30 (15 بانكروماتي)	الج يل الثا لث	1999 – 2013	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	La nd sat 7
تحليل نوعية المياه ودرجة حرارتها وتغيراتها الموسمية	دقة إشعاعية عالية، نطاقات جديدة للعاراة وحرارة السطح	11	16	30 × 30 (15 بانكروماتي)	الج يل الر ابع	2013 – 2025	Operational Land Imager (OLI) + Thermal Infrared Sensor (TIRS)	La nd sat 8

<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8>

شكل (1) يوضح تمثيلاً بيانياً للتسلسل الزمني لمهام أقمار لاندسات (Landsat)



تعد المؤشرات الفضائية من أهم الأدوات الحديثة في مجال الاستشعار عن بعد لرصد ومراقبة مساحة البحيرات، إذ تتيح إمكانية تتبع التغيرات المكانية والزمنية في مساحة المياه بدقة عالية وبتردد زمني منتظم. تكمن أهمية استخدام هذه المؤشرات في قدرتها على التمييز بين المسطحات المائية والعناصر الأرضية المحيطة بها مثل التربة والنباتات، وذلك من خلال تحليل الانعكاسات الطيفية في النطاقات المختلفة للأشعة الكهرومغناطيسية، خاصة في النطاقين المرئي وتحت الأحمر القريب. كما تساعد المؤشرات الفضائية في الكشف المبكر عن التغيرات البيئية التي قد تؤثر في البحيرات، مثل الجفاف أو الفيضانات أو الترسيب الطيني، مما يساهم في دعم إدارة الموارد المائية واتخاذ القرارات البيئية السليمة. إضافة إلى ذلك، تعتبر هذه المؤشرات وسيلة فعالة واقتصادية مقارنة بالطرق التقليدية الميدانية، حيث توفر بيانات شاملة تغطي مساحات واسعة وفترات زمنية طويلة، الأمر الذي يتيح دراسة ديناميكية البحيرات وتغير خصائصها المائية بدقة وموضوعية عالية (Shengfang Ma a b, et al, 2018)، اعتمدت الدراسة مجموعة من المؤشرات الطيفية لاستخراج مساحة المسطح المائي، كما هو موضح في الجدول (2). جدول (2) المؤشرات الطيفية المستخدمة في رصد ومراقبة المياه

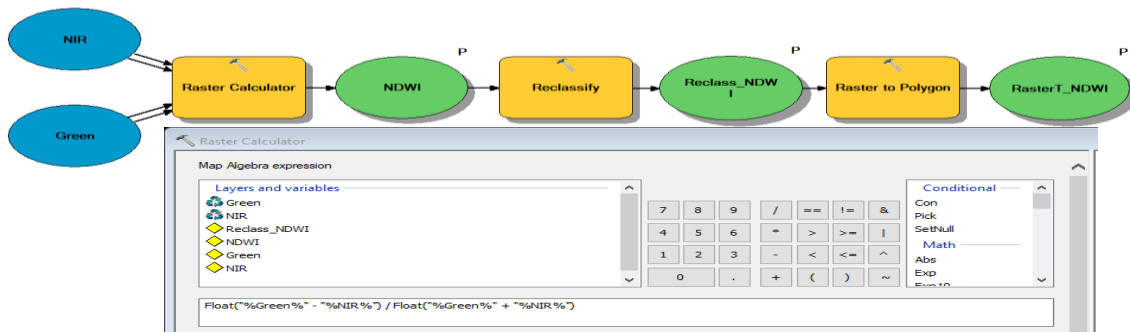
اسم المؤشر	المعادلة	الاستخدام
مؤشر المياه الطبيعي	$NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR)$	يتميز المسطحات المائية عن اليابسة القيم الموجبة تشير إلى وجود الماء، والسالبة تشير إلى اليابسة أو الغطاء النباتي.
مؤشر المياه المعدل	$MNDWI = (Green - SWIR) / (Green + SWIR)$	يحسن تمييز المياه عن المناطق الحضرية أو الأراضي الرطبة يقلل تأثير الظلال ويوفر حدود دقيقة للبحيرات.
مؤشر الفرق الطيفي للرطوبة	$NDMI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$	يستخدم لتمييز الرطوبة السطحية يساعد في رصد تقلص أو تمدد البحيرات الموسمية والأراضي الرطبة المحيطة.
مؤشر استخراج المياه الآلي	$AWEIsh = 4 \times (Green - SWIR1) - (0.25 \times NIR + 2.75 \times SWIR2)$	مؤشر دقيق لاستخراج المياه تلقائياً، يقلل أخطاء التمييز الناتجة عن الظلال أو الغطاء النباتي، فعال للبحيرات الكبيرة والصغيرة.
مؤشر المياه الأزرق	$BWI = (Blue + Green) - (NIR + SWIR)$	يستخدم للكشف عن المياه الضحلة والبحيرات الصغيرة، فعال مع بيانات Sentinel-2 لتحديد المسطحات المائية.

<https://eos.com/make-an-analysis/ndwi/>

• مؤشر المياه الطبيعي (NDWI):

يعد NDWI من أكثر المؤشرات شيوعاً في رصد البحيرات، ويعتمد على مقارنة الانعكاسات في النطاق الأخضر (Green) ونطاق الأشعة تحت الحمراء القريبة (NIR). تكمن أهميته في قدرته على التمييز الفوري بين المسطحات المائية واليابسة، حيث تعكس المياه الضوء الأخضر بشكل أكبر وتمتص الأشعة تحت الحمراء، مما يؤدي إلى ظهور القيم الموجبة للماء والقيم السالبة لليابسة. شكل (٢) وجدول (٣) عند تحليل صور الأقمار الصناعية باستخدام NDWI، يشير اللون أو القيمة الموجبة في الخريطة إلى المناطق التي تحتوي على مياه، بينما تشير القيم السالبة إلى اليابسة أو الغطاء النباتي المحيط بالبحيرات. هذا يجعل NDWI أداة فعالة لرصد التغيرات الموسمية أو الطويلة الأمد في مساحة البحيرات (Hanqiu Xu, 2006).

شكل (٢) تطبيق مؤشر (NDWI) في تحديد مساحة البحيرة



المصدر: من عمل الباحثة بالاعتماد على برنامج ArcGIS. جدول (٣) تطبيق المؤشرات الطيفية ضمن أجيال القمر الصناعي لاندسات المختلفة

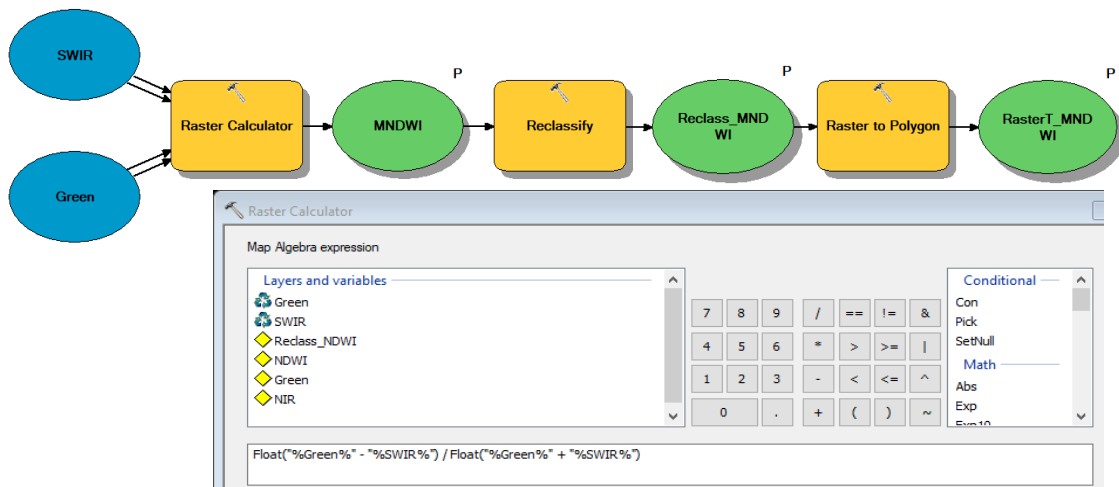
Landsat 8/9 OLI/OLI-2	Landsat 7 ETM+	Landsat 4-5 TM	المؤشر	
Green (Band 3), NIR (Band 5)	Green (Band 2), NIR (Band 4)	Green (Band 2), NIR (Band 4)	NDWI	مؤشر المياه الطبيعي
Green (Band 3), SWIR1 (Band 6)	Green (Band 2), SWIR1 (Band 5)	Green (Band 2), SWIR1 (Band 5)	MNDWI	مؤشر المياه المعدل
NIR (Band 5), SWIR1 (Band 6)	NIR (Band 4), SWIR1 (Band 5)	NIR (Band 4), SWIR1 (Band 5)	NDMI	مؤشر الفرق الطيفي للرطوبة
Green (Band 3), NIR (Band 5), SWIR1 (Band 6), SWIR2 (Band 7)	Green (Band 2), NIR (Band 4), SWIR1 (Band 5), SWIR2 (Band 7)	-	AWEI	مؤشر استخراج المياه الآلي
Blue (Band 2), Green (Band 3), NIR (Band 5), SWIR1 (Band 6)	Blue (Band 1), Green (Band 2), NIR (Band 4), SWIR1 (Band 5)	-	BWI	مؤشر المياه الأزرق

<https://eos.com/make-an-analysis/ndwi/>

• مؤشر المياه المعدل (MNDWI Index):

تم تطوير MNDWI لتحسين دقة تمييز المياه عن المناطق الحضرية أو الأراضي الرطبة، وذلك باستخدام النطاق الأخضر و SWIR (الأشعة تحت الحمراء المتوسطة). تكمن أهميته في قدرته على إزالة تأثير الظلال والمناطق الحضرية التي قد تتداخل مع التقدير الصحيح لمساحة البحيرات، عند استخدام هذا المؤشر، تظهر البحيرات والمسطحات المائية بوضوح أكبر مقارنة باليابسة، حتى في المناطق المعقدة أو الجبلية، شكل (٣)، القيم الموجبة للمؤشر تعكس وجود الماء بدقة، بينما القيم السالبة تشير إلى اليابسة أو الأراضي غير المائية. MNDWI مفيد بشكل خاص في الدراسات التي تهدف إلى متابعة تغير مساحة البحيرات في المناطق الحضرية أو المناطق ذات التضاريس المعقدة (Hanqiu Xu 2006).

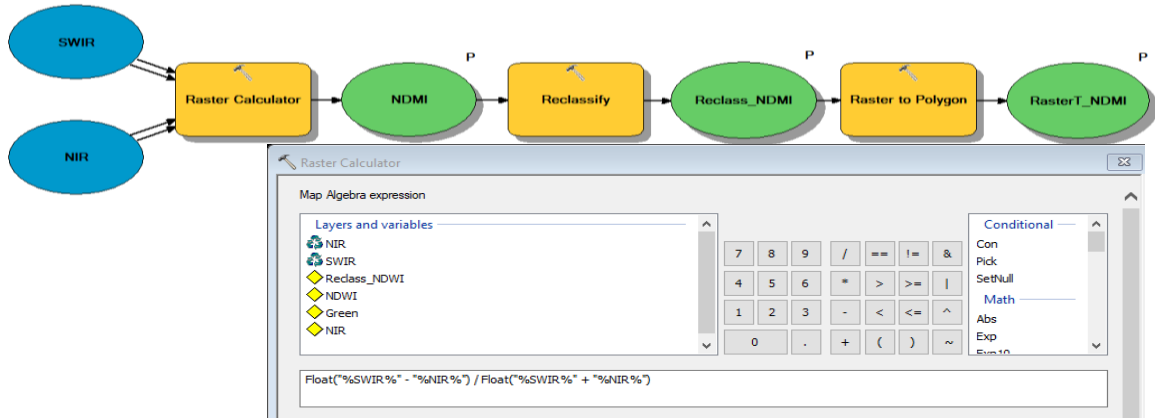
شكل (٣) تطبيق مؤشر (MNDWI) في تحديد مساحة البحيرة



المصدر: من عمل الباحثة بالاعتماد على برنامج ArcGIS.

• مؤشر الفرق الطيفي للرطوبة (NDMI):

يستخدم NDMI أساساً لقياس رطوبة سطح الأرض، باستخدام النطاقات NIR و SWIR. أهميته في رصد البحيرات تأتي من قدرته على تحديد المياه السطحية والأراضي الرطبة المحيطة بالبحيرات، مما يساعد في مراقبة التغيرات الموسمية، مثل تقلص البحيرات خلال الجفاف أو توسعها خلال الأمطار الغزيرة. شكل (٤)، عند تحليل النتائج، تشير القيم الموجبة إلى مناطق ذات رطوبة عالية أو مياه سطحية، بينما القيم السالبة تمثل الأراضي الجافة. NDMI يعد مفيداً لدراسة التغيرات الديناميكية في البحيرات الموسمية والأراضي الرطبة المحيطة بها (Wilson, 2002). شكل (٤) تطبيق مؤشر (NDMI) في تحديد مساحة البحيرة

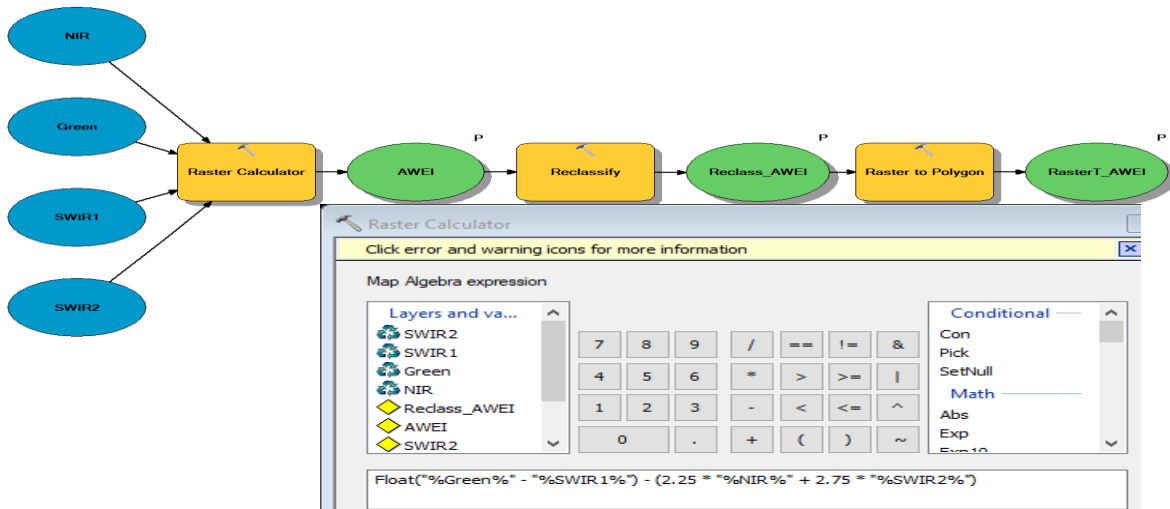


المصدر: من عمل الباحثة بالاعتماد على برنامج ArcGIS.

• مؤشر استخراج المياه الآلي (AWEI):

يعد AWEI من الأدوات الأكثر دقة لاستخراج المسطحات المائية تلقائياً، خاصة في المناطق المعقدة مثل المناطق الجبلية أو حيث يظل الغطاء النباتي. يعتمد المؤشر على دمج عدة نطاقات طيفية (Green, NIR, SWIR) بطريقة تقلل تأثير الظلال وتباين الأرض المحيطة. أهميته تكمن في قدرته على تحديد البحيرات الصغيرة والكبيرة بشكل دقيق، حتى في الظروف الصعبة. عند استخدام AWEI، تظهر القيم الموجبة للمياه، بينما القيم السالبة أو الصفرة تشير إلى اليابسة أو مناطق غير مائية. شكل (٥)، هذا المؤشر مفيد جداً في عمليات الرصد الآلي لمراقبة مساحة البحيرات على مدى واسع وبشكل دوري (Feyisa, et al, 2014).

شكل (٥) تطبيق مؤشر (AWEI) في تحديد مساحة البحيرة



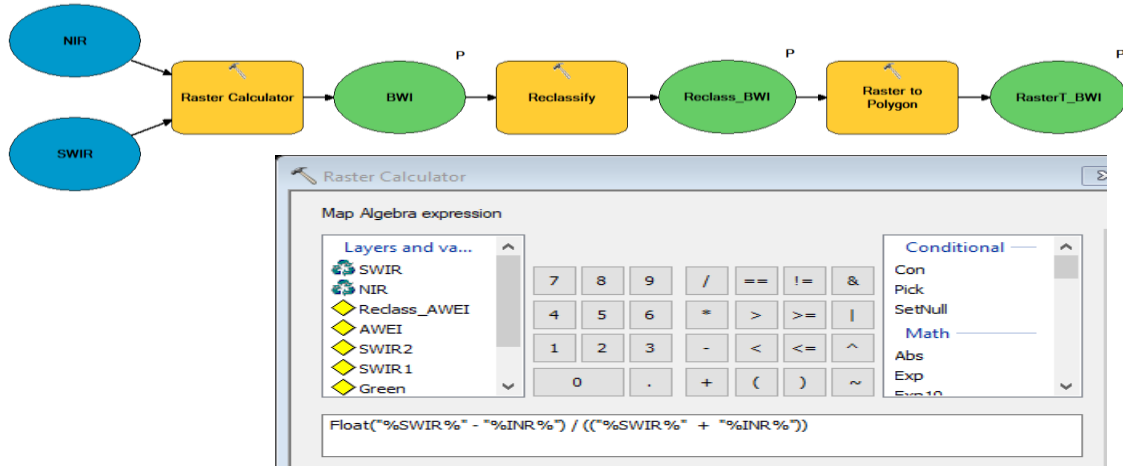
المصدر: من عمل الباحثة بالاعتماد على برنامج ArcGIS.

• مؤشر المياه الأزرق (BWI):

يستفيد BWI من النطاقين الأزرق والأخضر مقارنة بالنطاقات NIR و SWIR لتمييز المياه عن اليابسة. أهميته تكمن في كفاءته في الكشف عن المياه الضحلة والبحيرات الصغيرة، والتي قد لا تظهر بوضوح في مؤشرات أخرى. عند تفسير النتائج، تشير القيم الموجبة إلى المسطحات

المائية، بينما تمثل القيم السالبة اليابسة. شكل (٦)، هذا المؤشر مناسب لدراسة البحيرات الصغيرة والمساحات المائية الموسمية & Fisher, (Danaher, 2016).

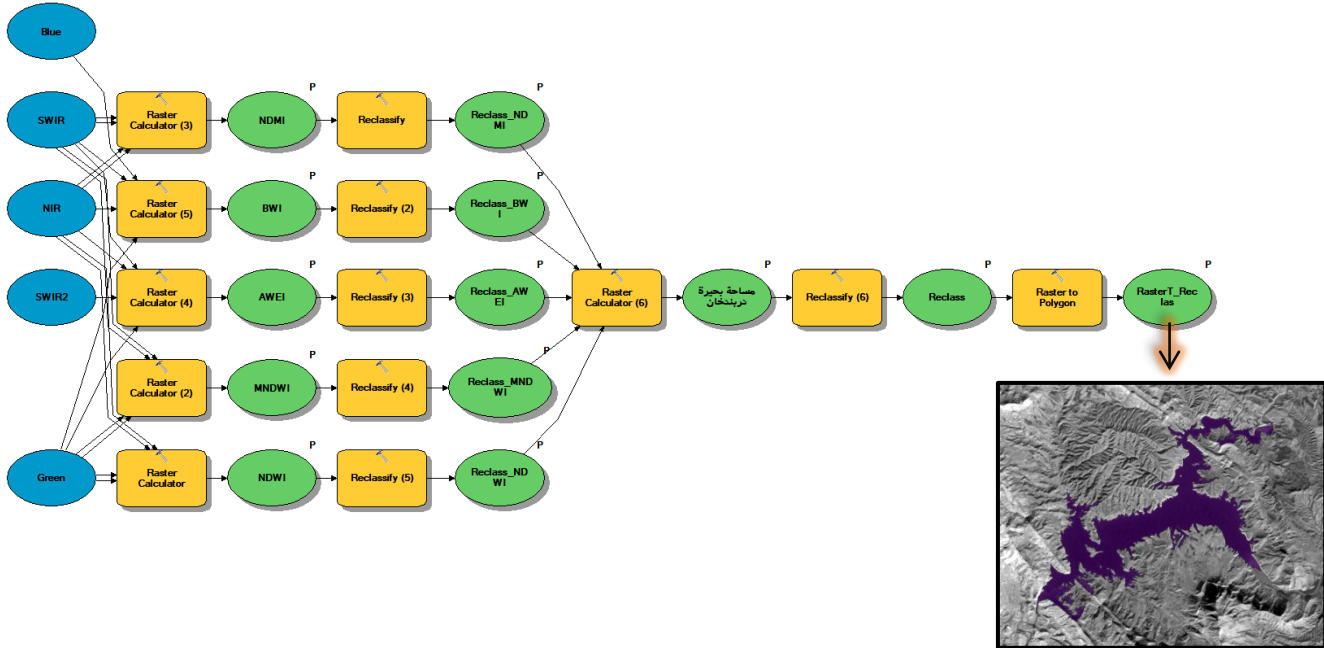
شكل (٦) تطبيق مؤشر (BWI) في تحديد مساحة البحيرة



المصدر: من عمل الباحثة بالاعتماد على برنامج ArcGIS.

٣- تحليل أنماط التغيرات المكانية والزمانية لبحيرة دربندخان: اعتمد تحليل التغيرات المكانية والزمانية لبحيرة دربندخان على استخدام بيانات الأقمار الصناعية متعددة الأجيال، التي وفرت سلسلة زمنية دقيقة من الصور الفضائية، مكنت من متابعة ديناميكية المساحة المائية للبحيرة عبر فترات زمنية ممتدة. وقد تم استخدام النمذجة الخرائطية والتحليلات الهيدرولوجية ضمن بيئة نظم المعلومات الجغرافية (GIS) لتحديد الامتداد الفعلي للبحيرة ورصد التغيرات المكانية والزمانية الناتجة عن العوامل المناخية والأنشطة البشرية في الحوض المائي المغذي لها.

شكل (٧) نمذجة مساحة بحيرة دربندخان باستخدام أداة Model Builder



المصدر: من عمل الباحثة. بالاعتماد على أداة Model Builder في بيئة نظم المعلومات الجغرافية (ArcGIS). تشير بيانات الجدول (٤) والشكل (٨) إلى وجود تذبذب واضح في المساحة المائية لبحيرة دربندخان خلال المدة الممتدة من عام ١٩٨٥ إلى عام ٢٠٢٥، وهو تذبذب يعكس بوضوح التأثير المتبادل بين العوامل المناخية والهيدرولوجية والأنشطة البشرية داخل الحوض المائي للبحيرة. فقد بلغت المساحة المائية أعلى قيمها

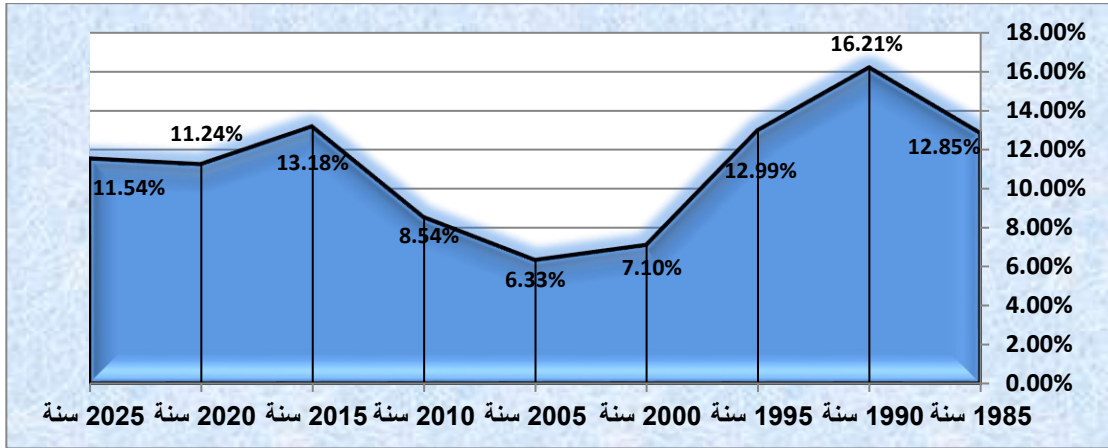
في عام ١٩٩٠ بمقدار ٧٤.٥٩ كم² وبنسبة ١٦.٢١٪، وبمعدل تغير نسبي (+٢٦٪) مقارنة بعام ١٩٨٥، ويعزى هذا الارتفاع الموجب إلى غزارة الأمطار خلال تلك السنة وزيادة معدلات الجريان السطحي القادمة من أعالي حوض نهر ديالى، بالإضافة إلى انتظام الإطلاقات المائية من السدود والمناخ الجبلية الواقعة ضمن الحدود الإيرانية، مما أدى إلى زيادة ملحوظة في حجم الخزن المائي داخل البحيرة واستقرار منسوبها. كما ساهمت الظروف المناخية المستقرة نسبياً آنذاك في تقليل معدلات التبخر ودعم التوازن الهيدرولوجي. إلا أن هذه الوفرة لم تستمر طويلاً، إذ بدأت البحيرة تشهد انخفاضاً تدريجياً بعد عام ١٩٩٠ لتصل إلى مساحة ٥٩.٧٧ كم² في عام ١٩٩٥ بنسبة ١٢.٩٩٪، وبمعدل تغير نسبي (-١٩.٩٪) مقارنة بعام ١٩٩٠، ويعزى هذا التراجع السالب إلى تكرار فترات الجفاف وانخفاض كميات الأمطار خلال النصف الأول من التسعينات، إضافة إلى ارتفاع درجات الحرارة وزيادة معدلات التبخر، فضلاً عن توسع النشاط الزراعي في المناطق المجاورة لمجرى نهر ديالى وما رافقه من استهلاك مفرط للمياه. واستمر هذا الانخفاض بشكل حاد حتى بلغ أدنى مستوى له في عام ٢٠٠٥ حين انكمشت البحيرة إلى ٢٩.١٣ كم² بنسبة ٦.٣٣٪ فقط، بعد أن كانت ٣٢.٦٨ كم² في عام ٢٠٠٠، وبمعدل تغير نسبي (-١٠.٩٪) مقارنة بعام ٢٠٠٠، ويعزى هذا الانخفاض الشديد إلى موجات الجفاف القاسية التي تأثرت بها المنطقة في مطلع الألفية الجديدة، مع انخفاض الإطلاقات المائية من دول الجوار نتيجة بناء السدود في أعالي الحوض، إضافة إلى تراكم الرواسب في خزان السد مما قلل من سعته التخزينية الفعلية وقدرته على استيعاب كميات أكبر من المياه. وفي عام ٢٠١٠ بدأت البحيرة باستعادة جزء من مساحتها لتصل إلى ٣٩.٣٠ كم² بنسبة ٨.٥٤٪، وبمعدل تغير نسبي (+٣٤.٩٪) مقارنة بعام ٢٠٠٥، وهو تحسن موجب ناتج عن زيادة نسبية في كميات الأمطار وتحسن إدارة الموارد المائية، كما شهدت المنطقة استقراراً مناخياً مؤقتاً أسهم في رفع منسوب المياه. واستمر هذا التحسن حتى عام ٢٠١٥ حيث بلغت مساحة البحيرة ٦٠.٦٤ كم² بنسبة ١٣.١٨٪، وبمعدل تغير نسبي (+٥٤.٣٪) مقارنة بعام ٢٠١٠، ويعزى ذلك إلى وفرة الأمطار الموسمية وازدياد التدفقات النهرية إلى السد مما أدى إلى ارتفاع منسوب الخزن وتحسن التوازن المائي للبحيرة. غير أن الوضع تغير بعد ذلك، إذ تراجعت مساحة البحيرة مجدداً في عام ٢٠٢٠ إلى ٥١.٧١ كم² بنسبة ١١.٢٤٪، وبمعدل تغير نسبي (-١٤.٧٪) مقارنة بعام ٢٠١٥، نتيجة التأثيرات الواضحة للتغير المناخي المتمثلة في ارتفاع درجات الحرارة وزيادة معدلات التبخر وانخفاض معدلات الهطول المطري، إلى جانب التوسع في الأنشطة الزراعية والصناعية التي رفعت من مستويات استهلاك المياه في الحوض. وفي عام ٢٠٢٥ سجل تحسن طفيف في المساحة لتصل إلى ٥٣.١١ كم² بنسبة ١١.٥٤٪، وبمعدل تغير نسبي (+٢.٧٪) مقارنة بعام ٢٠٢٠، وهو ارتفاع موجب محدود يعكس استقراراً نسبياً في الواردات المائية لكنه لا يشير إلى عودة البحيرة إلى حالتها الهيدرولوجية السابقة، خريطة (٢). من خلال هذا التحليل يتضح أن الاتجاه العام لمساحة بحيرة دربندخان يتسم بتذبذب واضح على المستويين الزمني والمكاني، نتيجة تداخل العوامل المناخية (كمية الأمطار ودرجات الحرارة ومعدلات التبخر) مع العوامل الهيدرولوجية (الإطلاقات المائية والتخزين السدي) والعوامل البشرية (الاستخدام الزراعي والصناعي للمياه). ويمثل هذا التغير في مساحة البحيرة انعكاساً مباشراً للتغيرات البيئية التي يشهدها الإقليم، ودليلاً على حساسية النظام المائي لبحيرة دربندخان تجاه أي اضطرابات مناخية أو بشرية، الأمر الذي يؤكد أهمية تبني إدارة متكاملة ومستدامة للموارد المائية لضمان استقرار النظام البيئي والهيدرولوجي للبحيرة في المستقبل. جدول (٤) التغير الزمني في مساحة بحيرة دربندخان خلال المدة (١٩٨٥ - ٢٠٢٥)

السنة	المساحة (كم ²)	النسبة المئوية %	التغير النسبي	التفسير
1985	59.11	12.85%	—	بداية فترة الرصد، تمثل حالة متوسطة
1990	74.59	16.21%	+25.90%	زيادة ملحوظة نتيجة وفرة الأمطار
1995	59.77	12.99%	-19.9%	انخفاض بسبب الجفاف النسبي
2000	32.68	7.10%	-45.3%	تراجع حاد نتيجة قلة الأمطار
2005	29.13	6.33%	-10.9%	انخفاض مستمر بفعل الجفاف
2010	39.3	8.54%	34.90%	تحسن نسبي في الواردات المائية
2015	60.64	13.18%	54.30%	ارتفاع واضح نتيجة وفرة الأمطار
2020	51.71	11.24%	-14.7%	تراجع بسبب التغير المناخي

تحسن طفيف واستقرار نسبي	2.70%	11.54%	53.11	2025
-------------------------	-------	--------	-------	------

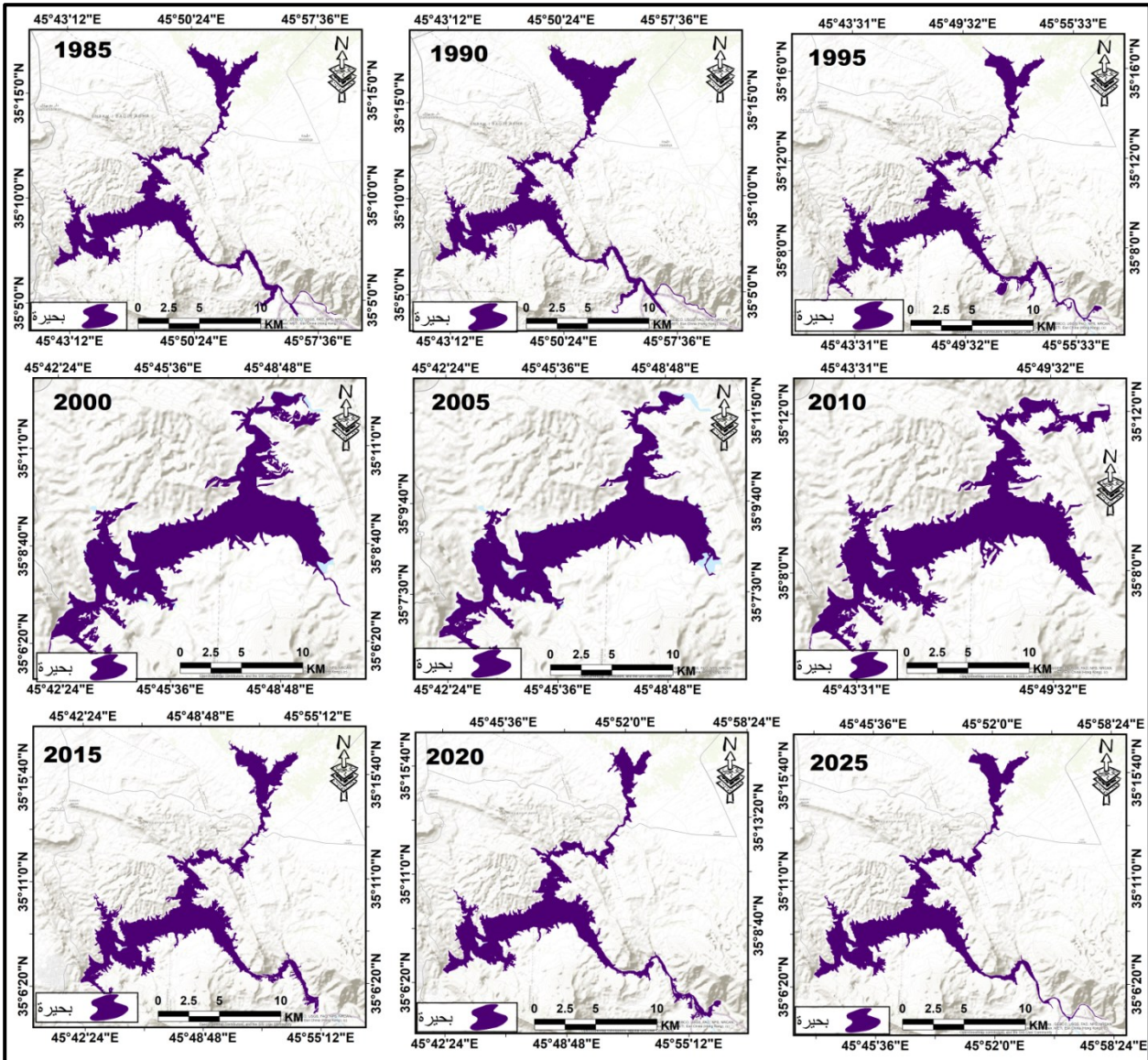
المصدر: من عمل الباحثة بالاعتماد على خريطة (٢).

شكل (٨) النسبة المئوية لمساحة بحيرة دربندخان للمدة (١٩٨٥ - ٢٠٢٥)



المصدر: من عمل الباحثة بالاعتماد على جدول (٤).

خريطة (٢) مساحة بحيرة دربندخان للمدة (١٩٨٥ - ٢٠٢٥)



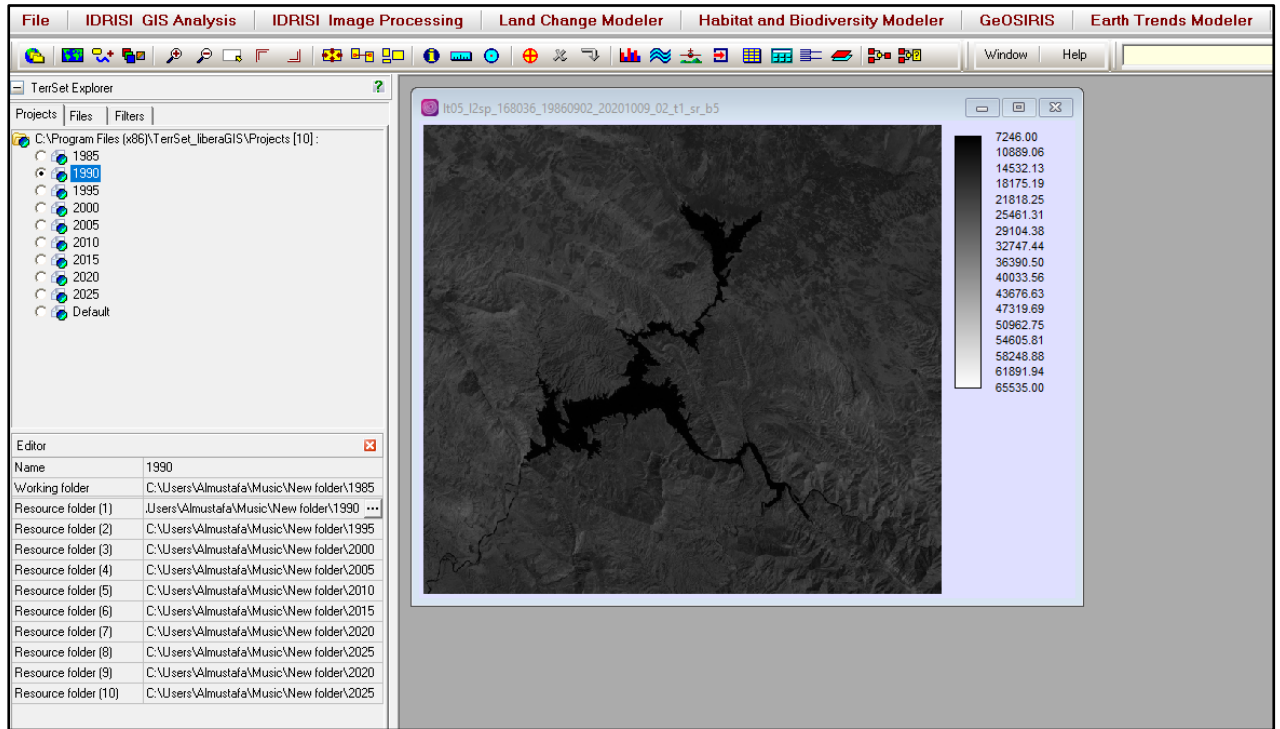
المصدر: من عمل الباحثة بالاعتماد على مرئيات القمر الاصطناعي Landsat ومخرجات برنامج ArcGIS.

٤- محاكاة مستقبلية لتغير مساحة بحيرة دربندخان باستخدام نموذج CA-Markov: يعد نموذج (Cellular Automata-Markov Model) أحد أهم النماذج المكانية-الزمنية المستخدمة في تحليل وتنبؤ التغيرات المستقبلية للغطاء الأرضي والمساحات المائية، لما يتميز به من قدرته على دمج البعدين الكمي والمكاني في عملية المحاكاة. يعتمد النموذج على مبدئين رئيسيين أولهما سلسلة ماركوف التي تستخدم لتحديد احتمالات الانتقال الكمية بين فئات الغطاء الأرضي خلال فترة زمنية محددة، استناداً إلى العلاقات الانتقالية المستخلصة من خرائط سابقة. أما المبدأ الثاني فهو الآلات الخلوية (Cellular Automata)، التي تعنى بتوزيع هذه التغيرات مكانياً ضمن الشبكة الخلوية (Raster Grid) اعتماداً على تأثير الجوار المكاني ومعاملات الإمكان المكاني (Suitability Factors) (Mondal, M. S., et al, 2019) تم تطبيق هذا النموذج على بحيرة دربندخان لغرض التنبؤ بالتحويلات المستقبلية في مساحة سطحها المائي، وذلك بالاعتماد على خرائط مساحة البحيرة المشتقة من مرئيات الأقمار الصناعية للفترة السابقة. تبدأ الخطوات العملية للنموذج بمعالجة الصور الفضائية (Landsat TM, ETM+, OLI) من خلال التصحيح الإشعاعي والهندسي، ومن ثم إجراء التصنيف المراقب باستخدام خوارزميات دقيقة مثل (Maximum Likelihood) أو (Support Vector Machine) للحصول على خرائط دقيقة تمثل الواقع البيئي للسنوات المعتمدة. بعد ذلك تجرى مصفوفة الانتقال (Transition Matrix) بين الفترتين لتحديد احتمالات التحول بين الفئات المختلفة، ولاسيما فئة المسطح المائي (البحيرة)، والتي تظهر مقدار الفقد أو الزيادة في المساحة خلال تلك الفترة الزمنية (Taloor, A. K., et al, 2024) تستخلص من نتائج مصفوفة ماركوف احتمالات التحول الكمية، في حين تنشأ خرائط الإمكان المكاني (Suitability Maps) باستخدام العوامل المؤثرة في ديناميكية مساحة البحيرة، مثل الانحدار الطبوغرافي، والانسياب السطحي، والبعد عن مجرى النهر الرئيس، والتغيرات في الغطاء النباتي والأراضي الزراعية، فضلاً عن المعطيات المناخية كالهطول والتبخير. تدمج هذه الخرائط ضمن بيئة الآلات الخلوية لتحديد المواقع الأكثر قابلية للتغير استناداً إلى تأثير الجوار المكاني ضمن نافذة محددة (3×3 أو 5×5 خلايا)، مما يمنح النموذج القدرة على تمثيل التغيرات المكانية بدقة عالية (Zhang, Z., et al, 2023) بعد تحديد معاملات النموذج وتكاملها، ينفذ التحقق الزمني (Validation) من خلال محاكاة فترة تاريخية سابقة ومقارنتها بالخرائط الفعلية لتلك الفترة، وذلك باستخدام مؤشرات الدقة مثل Overall Accuracy و Kappa Coefficient لضمان موثوقية النموذج قبل تنفيذ التنبؤ المستقبلي. ثم يستخدم النموذج في إسقاط (Projection) التغيرات المتوقعة لمساحة البحيرة في السنوات اللاحقة، استناداً إلى السيناريو الزمني المعتمد واستمرارية الاتجاهات السابقة في معدلات التغير.

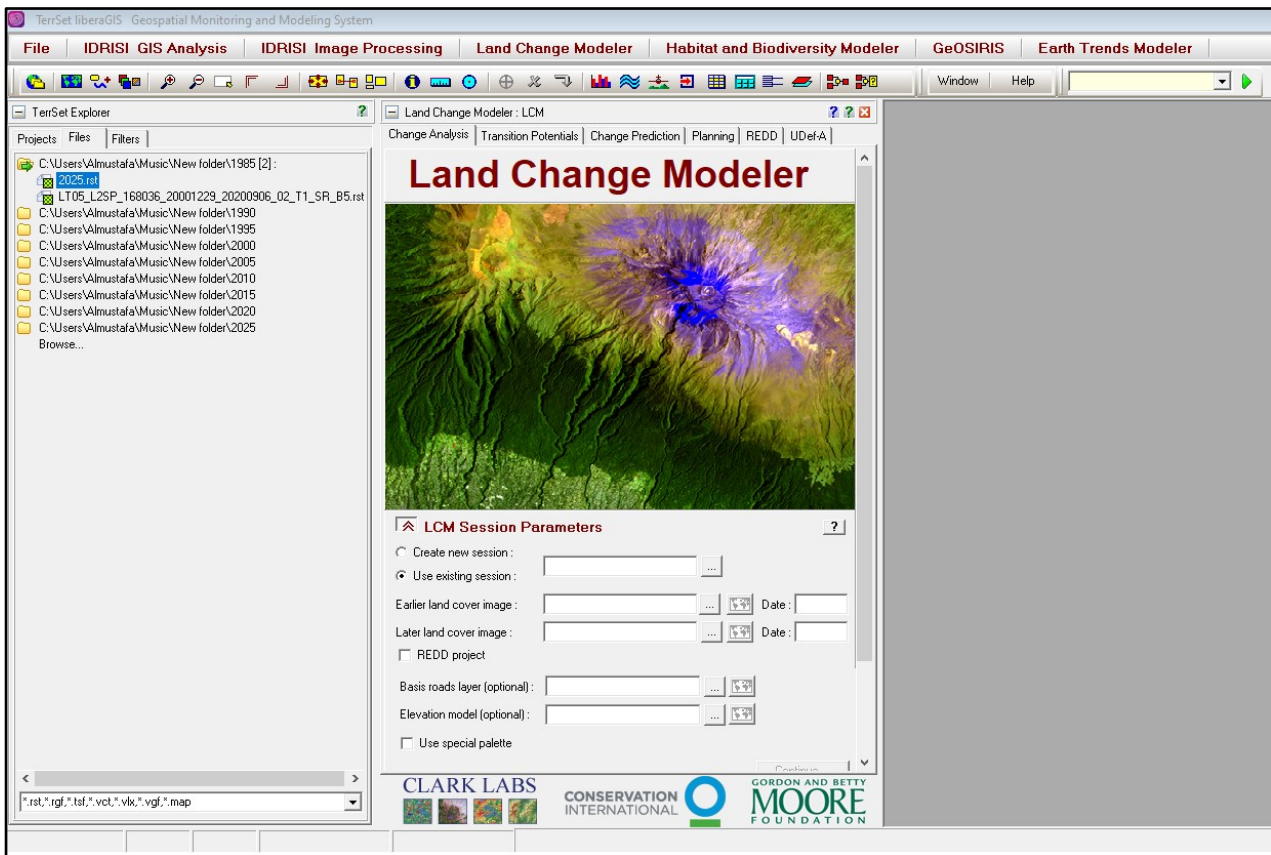
٥- منهجية تنفيذ نموذج CA-Markov:

لتطبيق نموذج CA-Markov لتنبؤ مساحة بحيرة دربندخان باستخدام صور الأقمار الصناعية Landsat للسنوات ١٩٨٥ و ١٩٩٠ و ١٩٩٥ و ٢٠٠٥ و ٢٠١٠ و ٢٠١٥ و ٢٠٢٠ و ٢٠٢٥، تبدأ العملية أولاً بجمع البيانات وتحضيرها. يتم تحميل صور الأقمار الصناعية لكل سنة من المصادر الموثوقة مثل USGS Earth Explorer، يلي ذلك إجراء التصحيحات الإشعاعية والغلاف الجوي لتقليل تأثيرات الإشعاع الجوي، ثم قص الصور لتغطية منطقة بحيرة دربندخان فقط وتوحيد الدقة المكانية لجميع الصور لضمان تتاسقها. بعد ذلك، يتم تصنيف الصور لتحديد مساحة البحيرة باستخدام طرق التصنيف المناسبة، سواء بالتصنيف الإشرافي Supervised Classification باستخدام عينات من البحيرة والمناطق المحيطة، أو بالاعتماد على المؤشرات الطيفية مثل NDWI أو MNDWI لتحديد المساحات المائية، ومن ثم تحويل الصور المصنفة إلى خرائط ثنائية Binary Raster، حيث يمثل الرقم ١ الماء والرقم ٠ غير الماء. في المرحلة التالية، يتم تحليل التغير الزمني من خلال مقارنة الصور المصنفة بين الفترات المختلفة لتحديد مصفوفة التحول بين السنين المتتالية، وتحديد احتمالات الانتقال لكل حالة مثل Water → Water، Water → Non-Water، Non-Water → Water، و Non-Water → Non-Water. بعد ذلك، يتم إدخال مصفوفة التحول في نموذج Markov Chain لتقدير التغيرات المستقبلية في المساحات، وإنشاء خرائط احتمالية لكل فترة زمنية. ثم يتم دمج نموذج (Cellular Automata CA): مع Markov لإضافة البعد المكاني للنموذج، حيث يتم أخذ تأثير الجيران لكل خلية على التحويلات المستقبلية في الاعتبار، وبذلك يمكن توليد الخرائط المستقبلية لمساحة البحيرة لكل سنة متوقعة بناءً على النتائج السابقة. لمراجعة دقة النموذج، تتم مقارنة نتائج التنبؤ للسنوات الحالية مثل ٢٠١٥ أو ٢٠٢٠ مع البيانات الفعلية، وحساب مؤشرات الدقة مثل Overall Accuracy و Kappa Coefficient. أخيراً، يمكن استخدام النموذج لتوقع مساحة البحيرة في السنوات المستقبلية مثل ٢٠٢٥ وما بعدها، وتحليل النتائج وإعداد الخرائط النهائية لمساحة البحيرة المتوقعة، بما يسهل اتخاذ القرارات التخطيطية والإدارية المتعلقة بإدارة الموارد المائية في المنطقة.

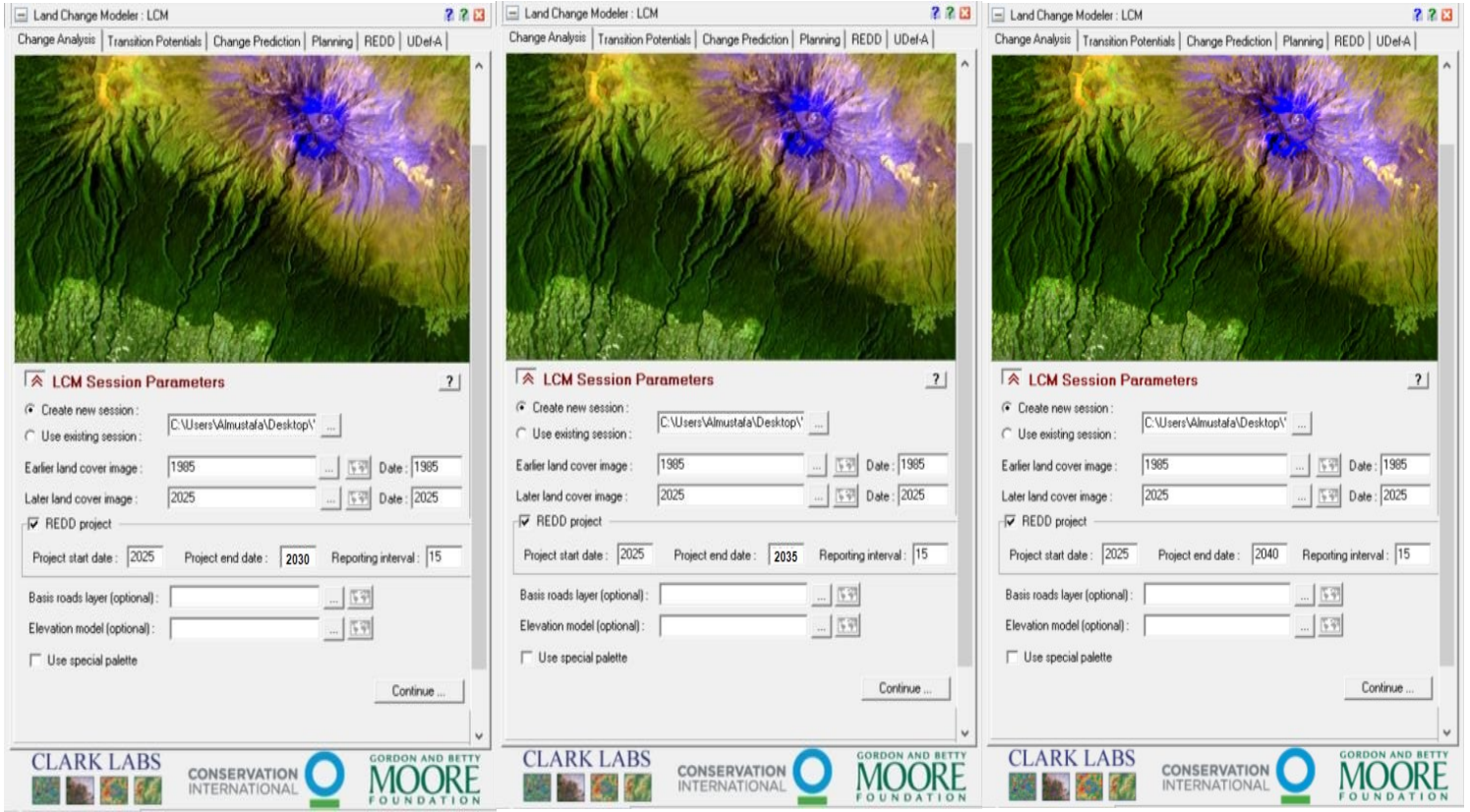
شكل (٩) استدعاء مرئيات القمر الاصطناعي Landsat للمدة الزمنية (1985 – 2025)



المصدر من عمل الباحثة بالاعتماد على برنامج (TerrSet). شكل (١٠) تفعيل نموذج Land Change Modeler



المصدر من عمل الباحثة بالاعتماد على برنامج (TerrSet). شكل (١١) تطبيق نموذج CA-Markov للتنبؤ بمساحة بحيرة دربندخان لعام (٢٠٣٠، ٢٠٣٥، ٢٠٤٠)



المصدر من عمل الباحثة بالاعتماد على برنامج (TerrSet).

٦- التنبؤ المستقبلي بتغيرات مساحة بحيرة دربندخان باستخدام نموذج (CA-Markov):

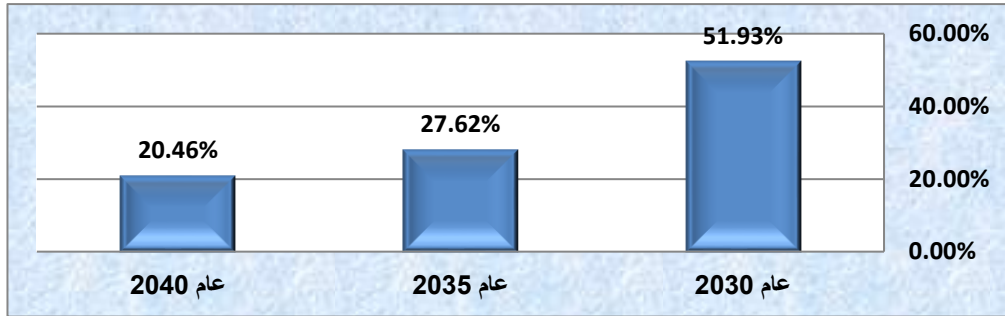
تشير نتائج جدول (٥) و شكل (١٢) أن مساحة بحيرة دربندخان ستستمر في التراجع خلال العقود القادمة وفقاً لتوقعات نموذج (CA-Markov)، إذ من المتوقع أن تنخفض من ٦٧.٥٨ كم² في عام ٢٠٣٠ بنسبة ٥١.٩٣٪ إلى ٣٥.٩٤ كم² في عام ٢٠٣٥ بنسبة ٢٧.٦٢٪، ثم إلى ٢٦.٦٢ كم² في عام ٢٠٤٠ بنسبة ٢٠.٤٦٪. ويعد هذا التناقص المتوقع امتداداً مباشراً للظروف البيئية والهيدرولوجية الحالية التي تعاني منها البحيرة اليوم، ما يجعل العلاقة بين الواقع الراهن والمستقبل علاقة استمرارية زمنية وليست تحولاً مفاجئاً، خريطة (٣). فالواقع الحالي للبحيرة يشهد انخفاضاً ملحوظاً في منسوب المياه بسبب قلة الإيرادات المائية الواردة عبر نهر ديالى، وهو وضع ناتج عن التوسع في بناء السدود والمشاريع المائية في أعالي الحوض ضمن الأراضي الإيرانية، إضافة إلى تزايد استهلاك المياه داخل العراق لأغراض الزراعة وتوليد الطاقة. واستمرار هذه السياسات المائية نفسها من دون تنسيق إقليمي أو تخطيط وطني مستدام سيؤدي في المستقبل إلى تقاوم مشكلة العجز المائي، وهو ما يفسر الانخفاض المستمر في المساحة المتوقعة للبحيرة في الأعوام القادمة. كما أن الارتفاع المستمر في درجات الحرارة في العراق بصورة عامة ومنها منطقة الدراسة يؤدي إلى زيادة كبيرة في معدلات التبخر، وهو عامل حاضر اليوم وسيزداد تأثيره في المستقبل في ظل التغير المناخي العالمي وازدياد ظاهرة الجفاف. وبالتالي فإن الانخفاض المتوقع في مساحة البحيرة بحلول عام ٢٠٤٠ هو نتيجة مباشرة لتراكم هذه الظواهر المناخية القائمة حالياً والتي يتوقع أن تصبح أكثر حدة في العقود المقبلة. إلى جانب ذلك، فإن نمط الإدارة المائية الحالي الذي يعتمد على أساليب ري تقليدية واستخدام مفرط للمياه في الزراعة حول البحيرة أدى إلى فقدان كميات كبيرة من المياه السطحية، ومع استمرار هذا النمط مستقبلاً من دون تطوير أنظمة الري أو اعتماد سياسات لترشيد الاستهلاك، ستزداد وتيرة التراجع في مستوى البحيرة كما أظهره النموذج التنبؤي. أما من الناحية البيئية، فإن مظاهر تدهور التنوع الحيوي التي بدأت تلاحظ حالياً مثل انخفاض أعداد الأسماك وتراجع وجود الطيور المائية المهاجرة ستكون أكثر وضوحاً في المستقبل مع تقلص المسطح المائي، إذ ستفقد الكائنات المائية بيئاتها الطبيعية بشكل أكبر. كما أن ارتفاع ملوحة التربة والمياه الذي بدأ يظهر في المناطق

الزراعية المحيطة سيزداد سوءاً مع استمرار التبخر وانخفاض التغذية المائية، ما سيؤدي إلى تدهور خصوبة الأراضي الزراعية وانخفاض الإنتاج الزراعي تدريجياً. أما من حيث التأثير المناخي المحلي، فإن دور البحيرة في تطيف المناخ وتقليل التطرف الحراري بدأ يتراجع بالفعل بسبب انحسار المسطح المائي، ومن المتوقع أن يؤدي تقلصها المستقبلي إلى زيادة الجفاف والعواصف الترابية وارتفاع درجات الحرارة في المنطقة المحيطة بها، مما ينعكس سلباً على النظم البيئية والزراعة والحياة البشرية. كما أن التأثيرات الاجتماعية والاقتصادية التي بدأت تظهر اليوم - مثل انخفاض موارد الصيد وتراجع النشاط الزراعي - ستعمق في المستقبل إذا استمرت الظروف نفسها، حيث سيؤدي ذلك إلى زيادة معدلات البطالة والهجرة البيئية من القرى المحيطة بالبحيرة نحو المناطق الحضرية.

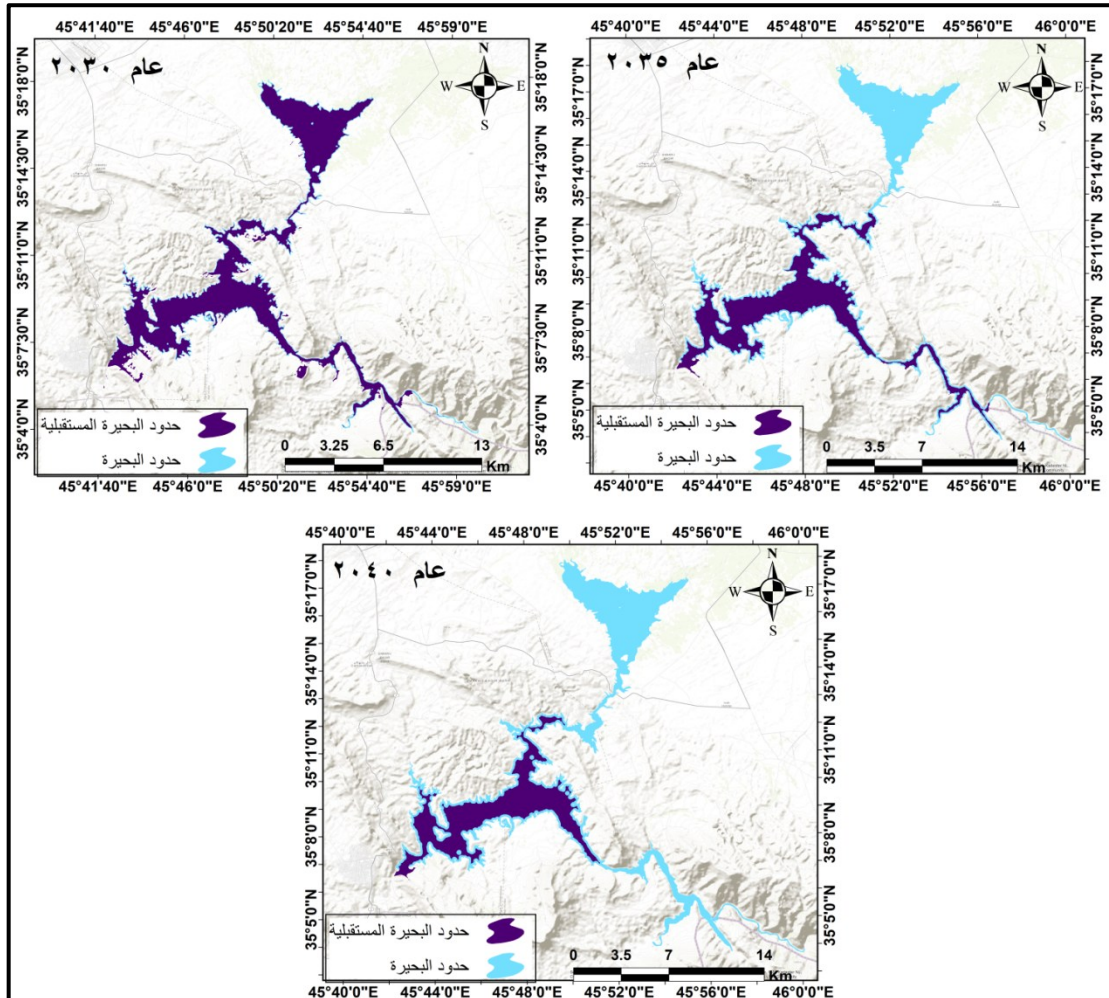
جدول (٥) التوقعات المستقبلية لمساحة بحيرة دربندخان.

67.58	المساحة كم ^٢	عام ٢٠٣٠
51.93%	%	
35.94	المساحة كم ^٢	عام ٢٠٣٥
27.62%	%	
26.62	المساحة كم ^٢	عام ٢٠٤٠
20.46%	%	

المصدر: من عمل الباحثة بالاعتماد على خريطة (٣). شكل (١٢) النسبة المئوية للمساحة المستقبلية لبحيرة دربندخان



المصدر: من عمل الباحثة بالاعتماد على جدول (٥). خريطة (٣) التوقعات المستقبلية لمساحة بحيرة دربندخان



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

- ١- تمثل بحيرة دربندخان مورداً مائياً استراتيجياً حيوياً في إقليم كردستان العراق، إذ تؤدي دوراً محورياً في تلبية احتياجات الزراعة ومياه الشرب والطاقة الكهرومائية، بالإضافة إلى كونها مؤثلاً رئيسياً للتنوع الأحيائي.
- ٢- أظهرت التحليلات أن البحيرة شهدت تذبذباً زمنياً واضحاً في مساحتها المائية خلال الفترة ١٩٨٥-٢٠٢٥، إذ تراوحت نسب الزيادة والنقصان بين (+٥٤.٣%) و(-١٩.٩%)، مما يعكس تأثير العوامل المناخية، الهيدرولوجية، والبشرية على ديناميكيتها المائية.
- ٣- تم استخدام بيانات الأقمار الصناعية Landsat-8 OLI لرصد التغيرات التاريخية، فيما اعتمد نموذج CA-Markov ضمن بيئة TerrSet لتوقع التغيرات المستقبلية في حجم البحيرة وتحليل انعكاساتها البيئية حتى عام ٢٠٤٠.
- ٤- تشير التنبؤات المستقبلية إلى استمرار تراجع مساحة البحيرة من ٦٧.٥٨ كم² (٥١.٩٣%) عام ٢٠٣٠ إلى ٢٦.٦٢ كم² (٢٠.٤٦%) عام ٢٠٤٠، ما يعكس استمرارية زمنية للظروف المناخية والهيدرولوجية الحالية دون حدوث تحولات مفاجئة في النظام المائي.
- ٥- تؤكد النتائج الحاجة إلى تبني استراتيجيات إدارة مائية متكاملة ومستدامة لضمان استقرار النظام البيئي والهيدرولوجي للبحيرة ومواجهة التحديات البيئية المستقبلية.

التوصيات:

- ١- تطوير خطة متكاملة تشمل مراقبة الإطلاقات وتقنين الاستهلاك الزراعي والصناعي باستخدام تقنيات ترشيد المياه.
- ٢- إنشاء نظام مراقبة هيدرولوجي مستمر يجمع بين بيانات الأقمار الصناعية مثل Landsat-8 و Sentinel-2، ومحطات قياس ميدانية لمراقبة المساحة المائية ومستوى التخزين بشكل دوري. ويجب دمج هذه البيانات مع نماذج التنبؤ المستقبلية مثل CA-Markov لتحليل السيناريوهات المختلفة واتخاذ قرارات استباقية تساهم في الحفاظ على التوازن الهيدرولوجي.
- ٣- تحسين التخزين المائي وحماية الغطاء النباتي حول البحيرة لتقليل التبخر والتكيف مع التغيرات المناخية.
- ٤- وضع خطط حماية بيئية للحفاظ على التنوع البيولوجي والنظام البيئي للبحيرة، بما في ذلك حماية الموائل المائية والبرية وإنشاء مناطق محمية لمنع الاستغلال المفرط للموارد الطبيعية وتحد من التدهور البيئي.
- ٥- دمج نتائج النماذج الهيدرولوجية ونموذج CA-Markov ضمن خطط التنمية المحلية والتخطيط الاستراتيجي طويل المدى لضمان إدارة مستدامة للبحيرة، مع تصميم سيناريوهات متعددة للتوسع الزراعي والصناعي دون الإضرار بالتوازن المائي.
- ٦- التوعية والمشاركة المجتمعية من خلال تنفيذ برامج تثقيفية للسكان حول أهمية البحيرة وتقليل الاستهلاك المفرط للمياه، وتشجيع المزارعين والمصانع على تطبيق ممارسات مستدامة للحد من التلوث والحفاظ على الموارد المائية.

المصادر:

- 1- NASA Goddard Space Flight Center. (2022). Landsat 4 and 5 Missions Overview. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-4-5>
- 2- Chander, G., Markham, B. L., & Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI, Remote Sensing of Environment, 113(5), 893–903. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>
- 3- USGS , Geological Survey . (2023). Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) Sensor Characteristics. <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-7>
- 4- Lymburner, L. et al. "Landsat 8: Providing continuity and increased precision for water mapping." Remote Sensing of Environment, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.04.011>

- 5- Mishra, N., Haque, M. O., Leigh, L., Aaron, D., Helder, D., & Markham, B. (2014). Radiometric Cross Calibration of Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+). *Remote Sensing*, 6(12), 12619–12638. <https://doi.org/10.3390/rs61212619>
- 6- Shengfang Ma a b, et al, 2018 , Application of the water-related spectral reflectance indices: A review, *Ecological Indicators* Volume 98, March 2019, Pages 68-79, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.10.049>
- 7- Hanqiu Xu (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>
- 8- Wilson, E. H., & Sader, S. A. (2002). Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery. *Remote Sensing of Environment*, 80(3), 385–396. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00318-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00318-2)
- 9- Feyisa, G. Let al (2014). Automated Water Extraction Index (AWEI): A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140, 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>
- 10- Fisher, A., Flood, N., & Danaher, T. (2016). Comparing Landsat water index methods for automated water classification in Eastern Australia. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.055>
- 11- Mondal, M. S., et al. (2019). CA MARKOV Modeling of Land Use Land Cover Dynamics and Sensitivity Analysis. *ISPRS Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W13, 723–729. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-723-2019>
- 12- Taloor, A. K., et al. (2024). Land Use Land Cover Simulations Using Integrated CA–Markov Model. *Geocomputation*, Article e01916. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2024.e01916>
- 13- Zhang, Z., et al. (2023). A Random Forest-Based CA–Markov Model to Examine the Dynamics of Land Use and Cover Change. *Remote Sensing*, 15(8), 2128. <https://doi.org/10.3390/rs15082128>