الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar – El Oued

Faculté de Technologie

Département de l'Hydraulique et de Génie Civil

Option : Conception et Diagnostic des Systèmes d'AEP et 'Assainissement

MEMOIRE

Apport de l'imagerie satellitaire dans le suivi de la qualité de l'eau du lac d'El Oued

Présenté par:

Boudina housseyn

- Lekhouimes Farid

Dr. Zaiz Issam	**Président**
Dr.Toumi Djaafer	**Examinateur**
Dr. Mega Nabil	**Encadreur**

Année Académique : 2025/2026

الملخص

تُعَدُّ الصور الفضائية أداةً حيويةً في تقييم نوعية المياه على نطاق واسع بفضل قدرتها على توفير بيانات دورية وشاملة لعوامل جودة المياه السطحية لبحيرة الشط ببلدية الوادي، مثل تركيز الكلوروفيل-أ والمواد العالقة الكلية والعكارة ودرجة حرارة السطح، مما يقلل التكاليف ويعزز دقة المراقبة المكانية والزمانية مقارنةً بالقياسات الحقلية التقليدية. بالرغم من نقص المعطيات الميدانية، تمكنا من متابعة بعض المعطيات مثل الكلوروفيل ودرجة حرارة الماء بدقة متفاوتة، ما يمهد الطريق لتطبيقات أوسع تُفيد إدارة الموارد المائية وحماية البيئة.

Résumé

Les images satellites présentent un outil essentiel pour évaluer la qualité de l'eau à grande échelle, grâce à leur capacité à fournir des données périodiques et complètes sur les facteurs de qualité des eaux de surface du lac Chott dans la municipalité d'El Oued, tels que la concentration en chlorophylle-a, les matières en suspension totales, la turbidité et la température de surface, ce qui réduit les coûts et améliore la précision de la surveillance spatiale et temporelle par rapport aux mesures de terrain traditionnelles. Malgré le manque de données de terrain, nous avons pu surveiller certains paramètres tels que la chlorophylle et la température de l’eau avec une précision variable, ouvrant la voie à des applications plus larges qui profitent à la gestion des ressources en eau et à la protection de l’environnement.

Abstract

Satellite images are a vital tool for large-scale water quality assessment due to their ability to provide periodic and comprehensive data on surface water quality factors of the Chott Lake in the municipality of El Oued, such as chlorophyll-a concentration, total suspended solids, turbidity, and surface temperature, reducing costs and enhancing spatial and temporal monitoring accuracy compared to traditional field measurements. Despite the lack of field data, we were able to monitor some parameters such as chlorophyll and water temperature with varying accuracy, paving the way for broader applications that benefit water resource management and environmental protection.

الإهـــداء

بسم الله الرحمن الرحيم، والحمد لله الذي وفقنا وأعاننا على إتمام هذا العمل المتواضع

نهدي ثمرة جهدنا وتعبنا إلى من كانوا سبب نجاحنا ووصولنا إلى هذه المرحلة، إلى والدينا الأعزاء الذين أحاطونا برعايتهم ودعمهم ودعواتهم الصادقة، فكانوا خير سند وعون لنا طوال مسيرتنا الدراسية.

إلى عائلاتنا الكريمة، وإخوتنا وأخواتنا الذين شاركونا أفراحنا وتحمّلوا معنا مشاق هذه الرحلة.

إلى أساتذتنا الأفاضل الذين أناروا لنا دروب العلم والمعرفة، وقدموا لنا التوجيه والنصح بكل إخلاص.

إلى زملائنا وأصدقائنا الذين رافقونا في مشوار الدراسة، وتقاسموا معنا لحظات الجد والاجتهاد والنجاح.

إلى كل من ساهم من قريب أو بعيد في إنجاز هذا العمل، وإلى كل من شجعنا وساندنا بكلمة طيبة أو دعاء صادق.

نهدي هذا العمل المتواضع، راجين من الله تعالى أن يجعله خطوة مباركة في طريق مستقبلنا، وأن ينفع به كل من يطلع عليه.

والحمد لله رب العالمين.

شكر وتقدير

الحمد لله تعالى الذي وفقنا وأعاننا على إتمام هذا العمل، والصلاة والسلام على سيدنا محمد صلى الله عليه وسلم.

نتقدم بأسمى عبارات الشكر والتقدير والامتنان إلى الدكتور المشرف (مقى نبيل)، على ما قدمه لنا من توجيهات قيمة ونصائح سديدة ومتابعة مستمرة طوال فترة إنجاز هذه المذكرة، وعلى سعة صدره وتفانيه في أداء رسالته العلمية.

كما نتوجه بجزيل الشكر إلى جميع أساتذة القسم الذين ساهموا في تكويننا العلمي والمعرفي، وكان لهم الفضل في ما وصلنا إليه من مستوى علمي.

ولا يفوتنا أن نتقدم بخالص الشكر والتقدير إلى أعضاء لجنة المناقشة لتفضلهم بقبول قراءة هذه المذكرة وتقييمها وإثرائها بملاحظاتهم القيمة.

ونعبر عن عميق امتناننا لكل من ساهم من قريب أو بعيد في إنجاز هذا العمل، وقدم لنا المساعدة والدعم المعنوي أو العلمي.

وفي الأخير، نسأل الله تعالى أن يجزي الجميع خير الجزاء، وأن يجعل هذا العمل خالصًا لوجهه الكريم.

الفهرس

الملخص i

الإهداء ii

الشكر iii

الفهرس iv

الفهرس v

قائمة الصور vi

قائمة الاختصارات vii

المقدمة العامة 1

الفصل الأول: الإطار العام للدراسة

مقدمة 5

عرض عام لمنطقة الدراسة 5

الموقع الجغرافي 6

الخصائص المناخية 7

المشكلات البيئية وأهمية الدراسة 9

الخاتمة 10

الفصل الثاني: منهجية الدراسة المتبعة في تقييم جودة المياه السطحية

مقدمة 12

لماذا Sentinel-2 ؟ 12

تعريف بالقمر الصناعيSentinel-2 12

خصائص Sentinel-2 في دراسة المسطحات المائية، 13

المؤشرات الطيفية المستخدمة في تقييم جودة المياه 13

مؤشر المياه المعياري(NDWI) 13

مؤشر الكلوروفيل(NDCI) 14

مؤشر العكارة(NDTI) 15

مؤشر درجة حرارة السطح(LST) 15

الوسائل والأدوات المستخدمة.....16

المنهجية المتبعة 17

خاتمة.....18

الفصل الثالث: تحليل المؤشرات الفضائية

مقدمة 20

حساب المؤشرات الفضائية.....21

مؤشر الكلوروفيل (NDCI) 22

مؤشر العكارة (NDTI) 24

مؤشر المياه (NDWI) 27

درجة حرارة سطح الأرض (LST) 29

العلاقة بين NDWI وNDCI 32

العلاقة بين NDWI وPh 34

العلاقة بين NDWI والأملاح الذائبة(R.S) 37

خرائط التوزيع المكاني ل -Ph 36

خرائط التوزيع المكاني للأملاح الذائبة(R.S) 39

خرائط التوزيع المكاني للموصلية الكهربائية(CE) 43

الخاتمة.....44

الخاتمة العامة.....46

قائمة الصور

صورة 01: الموقع الجغرافي لي الوادي.....6
صورة 02: موقع بحيرة الشط على صورة غوغل إيرث 8
صورة 03: صورة فنية للقمر الصناعي 13
صورة 04: نسبة الترابط لدرجة حرارة السطح بين Landsat-8وSentinel-2
صورة 05: المنهجية المتبعة في حساب المؤشرات.....17
صورة 06: تطور مؤشر الكلوروفيل لبحيرة الوادي (شهر مارس، سنوات 2018 إلى 2025).....23
صورة 07: تطور مؤشر العكارة لبحيرة الوادي (شهر مارس، سنوات 2018 إلى 2025).....26
صورة 08: تطور مؤشر المياه لبحيرة الوادي (شهر مارس، سنوات 2018 إلى 2025).....27
صورة 09: تغيرات الحرارة من 2018 الى 2025.....30
صورة 10: رسم بياني يوضح العلاقة بين NDWI و NDCI 33
صورة 11: رسم بياني يوضح العلاقة بين NDWI و pH 34
صورة 12: مؤشر الحموضة (pH) لسنة 2025.....36
صورة 13: العلاقة بين NDWI و R.S 37
صورة 14: التوزيع المكاني للأملاح الذائبة (لشهر مارس2025).....39
صورة 15: الرسم البياني يوضح العلاقة بين NDWI و CE.....41
صورة 16: التوزيع المكاني لقيم الموصلية الكهربائية للمياه 43

قائمة المختصرات

DSA : Direction des Services Agricoles.

DPSB : Direction de la Programmation et Suivi Budgétaires (2023).

ONM : Office Nationale de Météorologie.

NDWI: Normalized Difference Water Index

NDCI: Normalized Chlorophyll Water Index

NDTI: Normalized Difference Turbidity Index

SRTM: Shuttle Radar Topographic Mission

NASA : National Aeronautic Space and Administration

CI : Complexe Intercalaire

CT : Complexe Terminal

المقدمة العامة

يعد الماء من الموارد الحيوية التي لا غنى عنها لجميع أشكال الحياة، وهو عنصر أساسي في التنمية الاقتصادية والاجتماعية للمجتمعات البشرية. ومع ذلك، فإن جودة مصادر المياه السطحية تواجه تهديدات متزايدة نتيجة للأنشطة البشرية المتنوعة، مما يترتب عليه آثار سلبية خطيرة على البيئة وصحة الإنسان.

في هذا السياق، يصبح من الضروري مراقبة جودة المياه السطحية لضمان إدارة مستدامة لهذه الموارد الثمينة. وعلى الرغم من أن التقييم التقليدي لجودة المياه يعتمد على حملات أخذ العينات في الموقع، وهي أساليب فعالة لكنها مكلفة ومحدودة زمنياً ومكانياً، فإن ظهور تقنيات الاستشعار عن بُعد قد قدم بديلاً مكملًا يمكن من إجراء مراقبة دورية وشاملة للمسطحات المائية.

تعد صور الأقمار الصناعية، بما تتمتع به من قدرة على تغطية مساحات واسعة وتقديم معلومات ذات دقة زمانية ومكانية مناسبة، أداة أساسية في تقييم جودة المياه السطحية. ومن خلال معالجة بعض الأطياف الطيفية الخاصة، يمكن تقدير العديد من المؤشرات مثل العكارة، وتركيز المواد العالقة، أو حتى الكلوروفيل.

تهدف هذه الدراسة إلى استكشاف مساهمة الصور الفضائية في متابعة جودة مياه بحيرة الوادي، التي تعد من المسطحات المائية المهمة بيئيًا واقتصاديًا في المنطقة. فقد تعرضت هذه البحيرة في السنوات الأخيرة، لضغوط بيئية متزايدة (تلوث، أشغال تهيئة، جفاف،) تتطلب مراقبة مستمرة ودقيقة.

من خلال هذه الدراسة، نسعى إلى تسليط الضوء على التغيرات الزمانية والمكانية لبعض المؤشرات التي تعكس جودة المياه (مثل الكلوروفيل، مؤشر المياه، العكارة ودرجة حرارة المياه السطحية)، من خلال استغلال الإمكانيات التي توفرها أدوات معالجة الصور الفضائية. ثم البحث عن إمكانية استنباط المؤشرات الميدانية مثل درجة الحموضة (pH)، الناقلية الكهربائية (CE) وتركيز الأملاح الذائبة (R.S) من خلال الصور الفضائية، اعتمادا على مؤشر المياه (NDWI).

أهمية البحث:

تبرز أهمية هذا البحث في قدرته على تقديم وسائل دقيقة ومستدامة لمراقبة حالة المياه، دون الحاجة إلى تدخل ميداني دائم ومكلف. كما يساهم في دعم جهود حماية الموارد المائية والتخطيط البيئي السليم، اعتمادًا على معطيات حديثة ودورية (Lillesand et al., 2015; Matthews, 2011).

دوافع اختيار الموضوع:

تم اختيار هذا الموضوع نظرًا لتزايد التهديدات البيئية التي تواجه البحيرات والمسطحات المائية، وبالأخص بحيرة الشط ببلدية الوادي (ولاية الوادي)، بالإضافة إلى محدودية الوسائل التقليدية في رصد التغيرات المستمرة في نوعية المياه. كما يُعد توظيف صور الأقمار الصناعية من المواضيع الحديثة والمواكبة للتطورات التكنولوجية في مجال الدراسات البيئية.

أهداف البحث:

- إبراز دور الاستشعار عن بعد في متابعة جودة المياه.
- دراسة حالة بحيرة الوادي من خلال صور الأقمار الصناعية.
- تحليل أهم المؤشرات البصرية المرتبطة بجودة المياه مثل العكارة والطحالب.

- استنباط المؤشرات الميدانية من خلال الصور الفضائية.
- تقديم توصيات لتحسين آليات المراقبة البيئية في المنطقة.

عرض مختصر للخطة:

يتكون البحث من ثلاثة فصول، حيث يتناول الفصل الأول عرض منطقة الدراسة (بحيرة الوادي): جغرافيا المنطقة، مناخها، جيولوجيا وهيدروجيولوجيا منطقة الدراسة. أما الفصل الثاني فيخصص لجانب النظري، أين نستعرض خطة العمل، المعطيات الميدانية والمؤشرات الفضائية المراد حسابها. ويُعالج الفصل الثالث تحليل صور الأقمار الصناعية واستنتاج المؤشرات ذات الصلة بجودة المياه.

ـ تختتم الدراسة بتقديم النتائج والتوصيات المقترحة.

الفصل الأول

جغرافيا منطقة الدراسة

1.1. مقدمة:

تعد بحيرة الوادي إحدى أهم المسطحات المائية الداخلية في المنطقة الجنوبية الشرقية من الجزائر، حيث تشكل نظامًا بيئيًا فريدًا يلعب دورًا أساسيًا في التوازن البيئي والاقتصادي للمحيط المحلي. تمثل البحيرة مصدرًا مهمًا للمياه، كما تساهم في دعم التنوع البيولوجي من خلال احتضانها لأنواع متعددة من الكائنات الحية المائية والطيور المهاجرة.

في هذا الفصل، سنتطرق إلى عرض وافي لمنطقة الدراسة، من حيث الجغرافيا، مناخ، الجيولوجيا والهيدروجيولوجيا وجودة المياه السطحية لبحيرة الشط بالوادي.

2.1. تقديم منطقة الدراسة – بحيرة الوادي:

1.2.1. الموقع الجغرافي لمنطقة الوادي:

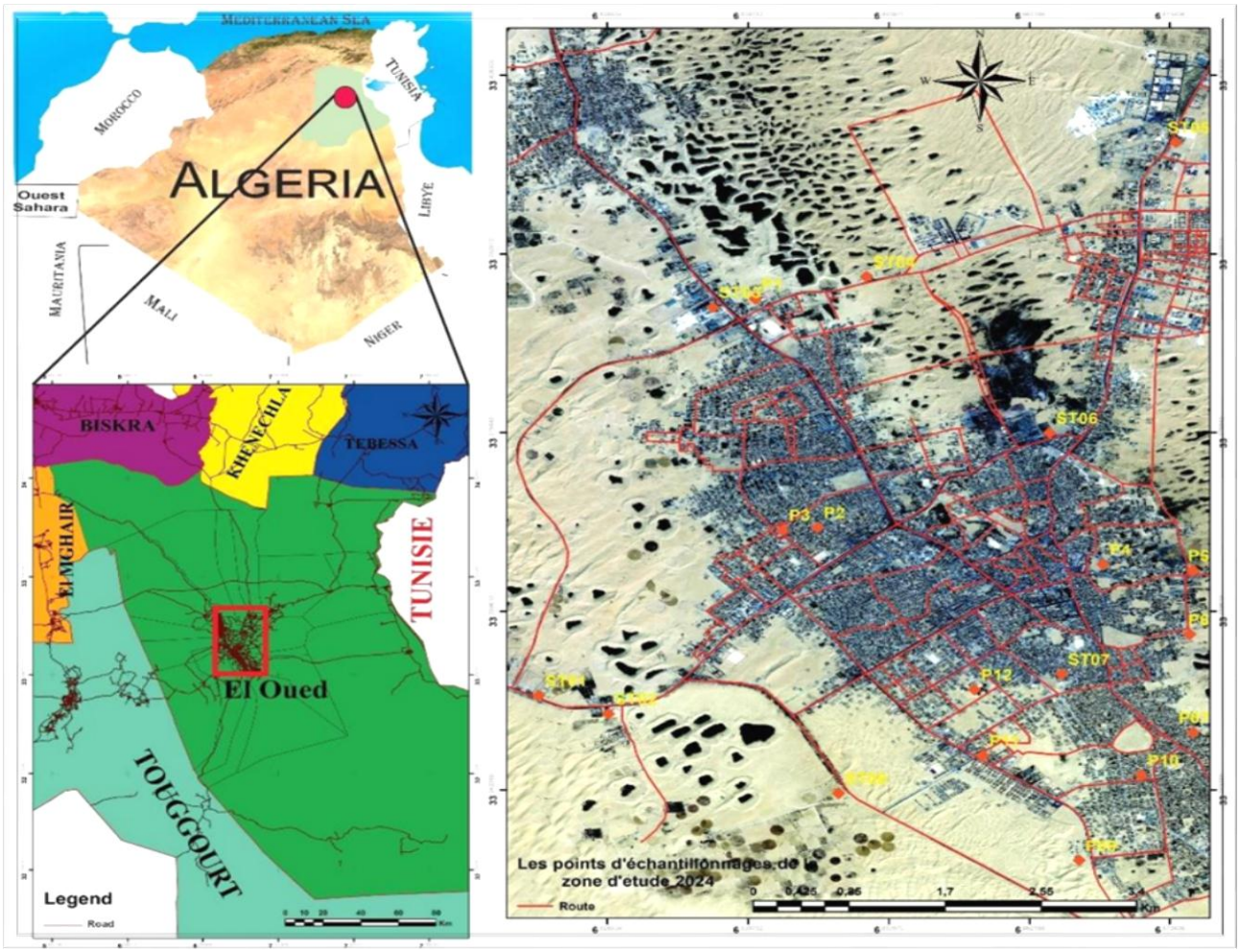
تقع منطقة الوادي، في جنوب شرق الجزائر، بين خطي عرض 33° و34° شمالاً وخطي طول 6° و8° شرقاً. وتتميز بمناظر طبيعية خلابة من أشجار النخيل تحيط بها كثبان رملية، وتقع على ارتفاع حوالي 70 متراً فوق مستوى سطح البحر (BEGGAS، 1992). تغطي ولاية الوادي مساحة قدرها 44,585 كيلومتراً مربعاً، ويبلغ عدد سكانها حوالي 990,000 نسمة، مما ينتج عنه كثافة سكانية تبلغ 12 نسمة لكل كيلومتر مربع.
وهناك مراجع أخرى تقول بان الولاية تغطي مساحة قدرها حوالي 14,518.33 كيلومتراً مربعاً (المكتب الوطني للإحصاء، 2013).

ويُعزى هذا الاختلاف إلى اختلاف سنوات الإحصاء ومصادر البيانات. وفقًا لبيانات مديرية التخطيط والإحصاء لولاية الوادي (DPS) لعام 2023.

تحدها:

- ➢ شمالاً: ولايات بسكرة، وخنشلة، وتبسة.
- ➢ شرقاً: تونس.
- ➢ غرباً: ولايتي المغير وتوقرت.
- ➢ جنوبا: ولاية ورقلة.

يبلـغ طـول حـدودها مـع تـونس حـوالي 300 كيلـومتر. ويغطـي العـرق الشـرقي الكبيـر ثلثـي أراضـيها. وتنقسـم الولايـة إلـى ثـلاث منـاطق فرعيـة رئيسـية (Hillisse, 2007): منطقـة الـوادي - منـاطق المنخفضـات (حمرايـة) - المنطقة الحدودية (الصورة 01).



الصورة 01: الموقع الجغرافي الوادي.

2.1.2. جيولوجيا وهيدروجيولوجيا المنطقة:

تتسم منطقة الوادي بجيولوجيا يغلب عليها الطابع الرسوبي، إذ تهيمن عليها تكوينات رملية تعود إلى العصور الرباعية، متمثلة في الكثبان الرملية الضخمة ذات النفاذية العالية، مع وجود طبقات طينية ومارلية متقطعة تساهم في الحد من حركة المياه الجوفية. وتستند الهيدرولوجيا المحلية أساسًا إلى نظامين مائيين رئيسيين، هما الخزان الجوفي السطحي محدود السعة والخزان القاري العميق واسع الامتداد. وتؤدي الظروف المناخية الصحراوية، المتمثلة في ندرة التساقطات وارتفاع معدلات التبخر، إلى ضعف التغذية المباشرة لهذه الطبقات المائية. كما أن المياه الجوفية بالمنطقة تتباين من حيث الملوحة والجودة حسب العمق والاتصال بالطبقات الحابسة، مما يؤثر على إمكانية استغلالها الفلاحي. وتبرز هذه الخصائص مجتمعة الحاجة إلى إدارة رشيدة ومستدامة للموارد المائية من خلال المراقبة المستمرة والاعتماد على تقنيات حديثة في الاستغلال

3.1. الخصائص الجغرافية لبحيرة الوادي:

1.3.1. الطبوغرافيا:

تتميز المنطقة المحيطة بالبحيرة بطبوغرافيا منخفضة نسبيًا، حيث تشكل أرضًا منبسطة إلى شبه منبسطة تتخللها بعض الكثبان الرملية. هذا الوضع الطبوغرافي يساعد على تجمع مياه الأمطار والجريان السطحي داخل الحوض، لكنه في المقابل يسهل ترسيب المواد الصلبة والملوثات في المياه (الصورة 02).

الصورة 02: موقع بحيرة الشط على صورة غوغل إيرث.

2.3.1. المناخ:

تخضع منطقة الوادي لمناخ صحراوي جاف، يتميز بارتفاع درجات الحرارة صيفًا وانخفاضها شتاءً، مع معدلات أمطار منخفضة وغير منتظمة (أقل من 100 مم سنويًا في المتوسط). يسود الجفاف معظم أشهر السنة، وتؤثر معدلات التبخر العالية على مستوى المياه وجودتها

3.3.1. الهيدرولوجيا:

تتغذى البحيرة بشكل أساسي من مياه الأمطار الموسمية والجريان السطحي القادم من المناطق المجاورة، بالإضافة إلى مياه الصرف الزراعي والصحي في بعض المواقع. وتؤدي هذه المصادر أحيانًا إلى إدخال كميات كبيرة من المواد العضوية والمغذيات، ما قد ينعكس على جودة المياه عبر زيادة التعكر وانتشار الطحالب.(2023) ONM (2013); DPSB El Oued)

4.1. المشكلات البيئية وأهمية الدراسة:

تعاني البحيرة من عدة مشاكل بيئية، من أبرزها:

- ارتفاع نسبة التعكر الناتج عن الجريان السطحي الحامل للرسوبيات.
- زيادة تراكيز الكلوروفيل-أ نتيجة الإثراء الغذائي (Eutrophication) من مياه الصرف، الأمر الذي يزيد من نسبة تلوث مياهها.
- تغيرات حرارية في سطح المياه نتيجة المناخ والتصريف المائي.
- تراجع المساحة المائية في فترات الجفاف الحاد.

هذه التحديات تجعل من الضروري تطوير نظام مراقبة دوري وموثوق، حيث تمثل تقنيات الاستشعار عن بعد، خصوصًا بيانات القمر الصناعي Sentinel-2، أداة فعّالة لتقييم ومتابعة المؤشرات البيئية الخاصة بجودة المياه مثل مؤشر الكلوروفيل (CHL)، مؤشر المياه (NDWI)، مؤشر التعكر (NDTI)، ودرجة حرارة السطح باستخدام بيانات حرارية من مصادر مكملة (LST). Wetzel (2001)

5.1 .الخاتمة

يمثل هذا الفصل مدخلًا لفهم الخصائص الجغرافية والبيئية لبحيرة الوادي، وهو الأساس الذي سيُبنى عليه التحليل الطيفي للمؤشرات البيئية في الفصول الموالية. إن الإحاطة الكاملة بالظروف الجغرافية للمنطقة تساعد في تفسير النتائج المكانية والزمانية، كما تسهّل اقتراح توصيات عملية للحفاظ على جودة المياه وضمان استدامة هذا المورد الحيوي.

ويأتي هذا الوصف التفصيلي ليشكل الأساس العلمي اللازم قبل الانتقال إلى الفصل الثاني، الذي سيخصص لعرض منهجية الدراسة المعتمدة، وخاصة آليات استخدام صور الأقمار الصناعية والمؤشرات الطيفية في تقييم جودة المياه. هذا الربط بين الإطار الجغرافي والنهج العلمي سيمكن من بناء تصور شامل يدمج بين المعطيات الميدانية والتحليل الفضائي، تمهيداً للوصول إلى نتائج دقيقة وموثوقة سيتم عرضها ومناقشتها في الفصل الثالث.

الفصل الثانى

منهجية الدراسة المتبعة في تقييم جودة المياه السطحية

1.2. مقــدمة

تُعـدّ مراقبـة جـودة الميـاه باسـتخدام تقنيـات الاستشـعار عـن بعـد أداة فعّالـة وذات مـردود علمـي كبيـر، خاصـة عنـد التعامـل مـع المسـطحات المائيـة التـي يصـعب مراقبتهـا ميـدانياً بشـكل دوري. فـي هـذا الإطـار، اعتمـدت هـذه الدراسـة علـى اسـتعمال المعطيـات الفضـائية المسـتخرجة مـن القمـر الصـناعي الأوروبـي Sentinel-2 مثـل المؤشـرات الطيفيـة المتخصصـة، بهـدف تقيـيم الوضـع البيئـي لبحيـرة الـوادي بدقـة زمانيـة ومكانيـة مناسـبة. وتسـمح هـذه المؤشـرات بقيـاس متغيـرات فيزيائيـة وكيميائيـة مرتبطـة بالميـاه، مثـل المحتـوى الكلـوروفيلّي، درجـة العكـارة، درجـة الحـرارة، ومؤشـر الميـاه الطبيعـي، وهـو ما يوفر قاعدة بيانات موثوقة للتحليل في الفصل الثالث.

2.2. لماذا Sentinel-2 ؟

1.2.2. تعريف بالقمر الصناعي Sentinel-2

ينتمـي القمـر الصـناعي Sentinel-2 إلـى برنـامج "كوبيرنيكـوس" (Copernicus) التـابع للاتحـاد الأوروبـي، والمخصـص لمراقبـة الأرض. تـم إطلاقـه بهـدف تـوفير بيانـات بصـرية **مجانيـة** متعـددة الأطيـاف (Multi-spectral) بدقـة مكانيـة تصـل إلـى 10 أمتـار (الصـورة 03)، وبفتـرة إعـادة زيـارة تبلـغ خمسـة أيـام، ممـا يجعلـه مثاليـاً لمتابعـة الظـواهر البيئيـة الديناميكيـة مثل المسطحات المائية (www1). Drusch et al. (2012)

الصورة 03: صورة فنية للقمر الصناعي Sentinel-2 (www1)

2.2.2 خصائص Sentinel-2 في دراسة المسطحات المائية

يحتوي القمر الصناعي Sentinel-2 على 13 نطاقاً طيفياً (Spectral-Bands) تغطي الطيف المرئي، القريب من الأشعة تحت الحمراء، والقصير الموجة للأشعة تحت الحمراء. بعض هذه النطاقات موجهة خصيصاً لدراسة المياه، مثل النطاق الأزرق (Band 2)، الأخضر (Band 3)، الأحمر (Band 4)، والنطاقات القريبة من الأشعة تحت الحمراء (Band 8 و Band 8A)، والتي تُستخدم في حساب المؤشرات الطيفية الخاصة بالمياه

3.2. مؤشر المياه (NDWI)

NDWI (Normalized Difference Water Index) هو مؤشر طيفي (المعادلة 1) يُستخدم للكشف عن وجود المياه السطحية وتمييزها عن الغطاء الأرضي الآخر. يعتمد على الفرق بين انعكاس الضوء في النطاق الأخضر والقريب من الأشعة تحت الحمراء (www1) (McFeeters, 1996)

$$NDWI = (Green + NIR) / (Green - NIR) \quad \text{..... (1) (McFeeters, 1996)}$$

حيث:

- Green: النطاق الأخضر (Band 3 في Sentinel-2)
- NIR: النطاق القريب من الأشعة تحت الحمراء (Band 8)

يساعد المؤشر NDWI في تحديد حدود البحيرة بدقة، ورصد التغيرات في مساحتها، خاصة في الفترات الجافة أو بعد أحداث فيضانيه. McFeeters (1996) ; Gao (1996)

4.2. مؤشر الكلوروفيل (Chlorophyll-a)

الكلوروفيل-أ NDCI (Normalized Difference CHLOROPHYLL Index) هو الصبغة الأساسية المسؤولة عن عملية التمثيل الضوئي في النباتات والطحالب. قياسه في المسطحات المائية يُعدّ مؤشراً أساسياً على إنتاجية المياه ومستوى الإثراء الغذائي (Eutrophication). تعتمد تقديرات الكلوروفيل-أ على النطاقات الطيفية في المنطقة الحمراء (Red) والحمراء الحافة (Red Edge) من صور Sentinel-2، حيث تمتص هذه الصبغة الضوء في الطيف حافة الأحمر وتعكسه بقوة في النطاق الأحمر (المعادلة 2) (Mishra & Mishra, 2012) (www1)

$$NDCI = (RE + R) / (RE - R) \quad \text{..... (2) (Mishra \& Mishra, 2012)}$$

حيث:

- RE: النطاق حافة الأحمر (Band 5 في Sentinel-2)
- R : النطاق الأحمر (Band 4)

يُستخدم مؤشر الكلوروفيل لتحديد مستويات نمو الطحالب في البحيرة، والذي قد يشير إلى وجود تلوث غذائي نتيجة تدفق المغذيات (Nutrients) من

الأنشطة الزراعية أو مياه الصرف ;(2012) Mishra & Mishra . Matthews (2011)

5.2. مؤشر العكارة (Turbidity)

العكارة NDTI (Normalized Difference Turbidity Index) هي مقياس لشفافية المياه، وتعبر عن وجود جسيمات صلبة عالقة، مثل الطين والرواسب والمواد العضوية الدقيقة (Dogliotti et al., 2015)

للحساب البسيط للمؤشر، تعتمد تقديرات العكارة على النطاقات الطيفية في الجزأين الأزرق والأحمر من صور Sentinel-2، حيث تعكس الجسيمات العالقة الضوء بشكل أكبر مقارنة بالمياه النقية (المعادلة 3) (www1).

$$NDTI = (R + B) / (R - B) \quad \text{..... (3) (Dogliotti et al., 2015)}$$

حيث:

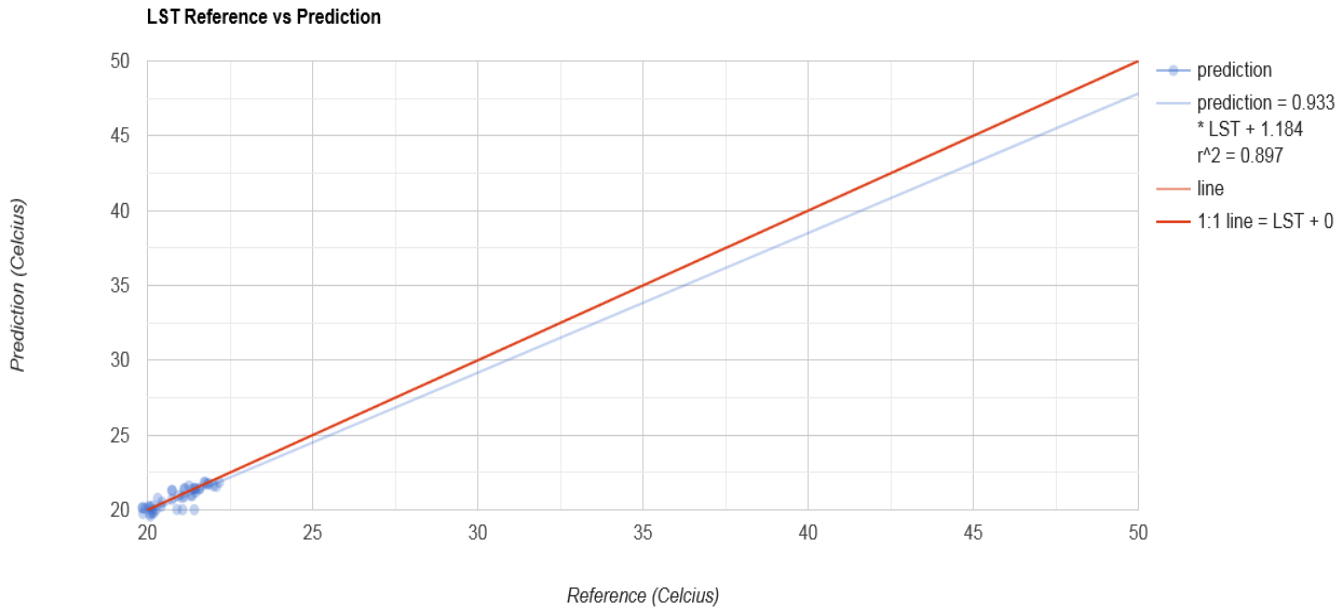
- R: النطاق الأحمر (Band 4 في Sentinel-2)
- B: النطاق الأزرق (Band 2)

يتيح تحليل العكارة رصد الأنشطة البشرية أو الطبيعية التي تزيد من حمل الرواسب، مثل الجرف المائي أو التصريف الصناعي والزراعي (2002) .Dekker et al

6.2. مؤشر درجة حرارة السطح (Land Surface Temperature)

درجة حرارة السطح أو المياه عامل حاسم في تحديد الظروف البيئية للمسطحات المائية، إذ تؤثر على الذوبان الحيوي للأكسجين، نشاط الكائنات الحية، وتفاعلات الملوثات. كما تمثل درجة حرارة المياه مؤشراً على التغيرات المناخية أو تأثيرات التصريفات الحرارية الناتجة عن الأنشطة البشرية (Weng, 2009)

رغم أن Sentinel-2 لا يحتوي على نطاق حراري مباشر، إلا أنه يمكن تقدير درجة الحرارة من خلال دمج البيانات مع مصادر أخرى (مثل Landsat-8) أو عبر نماذج تعتمد على العلاقة بين الانعكاسات الطيفية وبعض المعلمات الفيزيائية للماء. الطريقة تتمثل في حساب درجة حرارة السطح إنطلاقا من صور القمر الصناعي Landsat-8 ثم دمج النتيجة المتحصل عليها مع معطيات الطبوغرافيا الناتجة من صور الرادار الصناعي SRTM مع صور القمر الصناعي Sentinel-2. العملية تم



الصورة 04: نسبة الترابط لدرجة حرارة السطح بين Landsat-8 و Sentinel-2

7.2. الوسائل المستخدمة

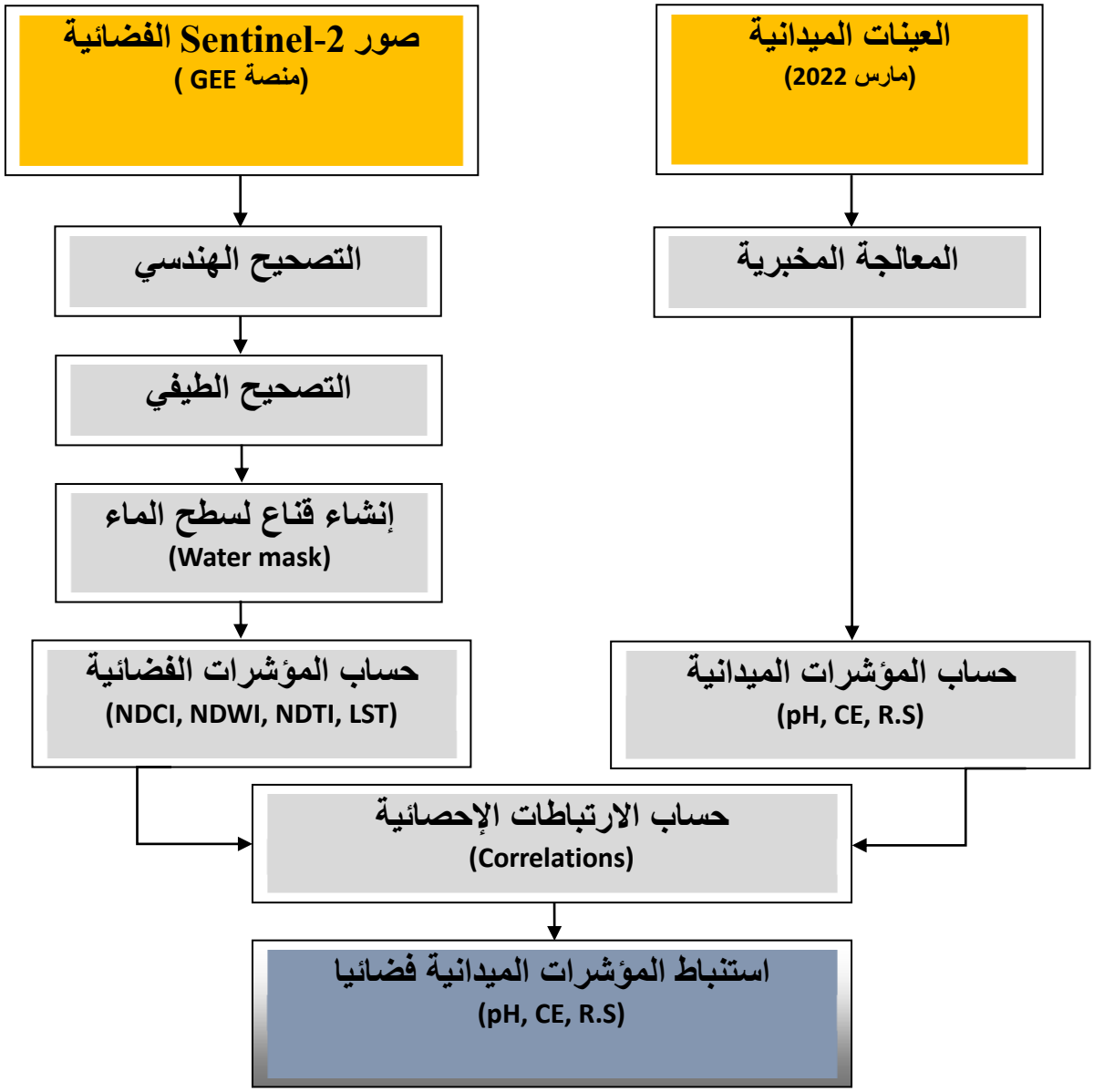
في هذه المذكرة، تم الاستعانة بمنصة Google Earth Engine (GEE)، لحساب مختلف المؤشرات (Indices) والارتباطات (Correlations)، باستخدام صور القمر الصناعي Landsat-8، صور الرادار الصناعي SRTM وصور القمر الصناعي Sentinel-2، لما تتوفر عليه هذه المنصة من إمكانيات هائلة في مجال تحليل الصور الفضائية الحوسبية (Cloud). تم تحديد شهر مارس من كل سنة لتحليل الصور الفضائية وحساب المؤشرات لكونه الشهر الذي تكون فيه البحيرة في

أوج نشاطها (ارتفاع منسوبها)، مقارنة بالشهور الأخرى (Gorelick et al., 2017)

أيضا، تم استخدام المعطيات الميدانية لسنة 2022 وهذا بسبب وجود ثلاث نقاط ميدانية فقط (من بين مجموع النقاط الأخرى) تم أخذ عيناتها من البحيرة، الأمر الذي مكننا من إجراء عملية استنباط المؤشرات الفضائية.Sobrino et al. (2004)

8.2. المنهجية المتبعة

الصورة 05 أدناه توضح رسما بيانيا لمختلف المراحل المتبعة من أجل حساب المؤشرات الفضائية، معالجة العينات الميدانية واستنباطها مستقبلا من خلال الصور الفضائية.



الصورة 05: المنهجية المتبعة في حساب المؤشرات

.8.2. الخاتمة:

لقد تناول هذا الفصل منهجية الدراسة المعتمدة لتقييم جودة مياه بحيرة الوادي، بالاعتماد على تقنيات الاستشعار عن بُعد ومعالجة صور الأقمار الصناعية Landsat-8، Sentinel-2 وSRTM. وقد تم التركيز على جملة من المؤشرات الطيفية التي أثبتت فعاليتها العلمية في رصد التغيرات البيئية، وهي مؤشر المياه المعياري (NDWI)، مؤشر الكلوروفيل (NDCI)، مؤشر العكارة (NDTI) ومؤشر درجة حرارة السطح (LST). اختيار هذه المؤشرات جاء استجابة لخصوصية البيئة المائية للبحيرة، وارتباط كل مؤشر بمتغيرات فيزيائية أو كيميائية محددة، تمثل مؤشرات مباشرة أو غير مباشرة لجودة المياه. وبناءً على ما تم استعراضه في هذا الفصل، يمكن القول إن المنهجية المعتمدة تمثل الإطار العلمي الذي ستبنى عليه التحليلات في الفصل الثالث، إذ سيتم عرض ومناقشة النتائج المستخلصة من معالجة الصور الفضائية وحساب المؤشرات الطيفية المطلوبة، مع تحليل العوامل المفسّرة للتغيرات الملحوظة، وتقييم مدى تأثيرها على النظام البيئي لبحيرة الوادي. هذا الانتقال من الإطار المنهجي إلى التحليل الميداني والفضائي سيشكل الخطوة الحاسمة للوصول إلى استنتاجات دقيقة وتوصيات عملية من شأنها الإسهام في الحفاظ على هذا النظام المائي الحيوي.

الفصل الثالث

تحليل المؤشرات الفضائية

1.3. المقدمة :

بعد عرض شامل لمنطقة الدراسة في الفصل الأول، وما تميزت به بحيرة الوادي من خصائص هيدرولوجية وبيئية متنوعة ، وانتقالنا في الفصل الثاني إلى البحث الذي اعتمد على حلول الاستشعار عن بعد لتحليل صور الأقمار الصناعية Sentinel-2 عبر مجموعة من المؤشرات الطيفية، ويأتي هذا الفصل الثالث ليشكل المرحلة التطبيقية والتحليلية من هذا العمل. يهدف هذا الفصل إلى التحول من الإطار النظري والمنهجي إلى تحليل النتائج الكمية والنوعية المتحصل عليها، من خلال فهم حالة جودة المياه في البحيرة خلال فترة الدراسة. في هذا السياق، يعتمد الفصل الثالث على البيانات الميدانية والإحصائية، حساب مختلف المؤشرات الفضائية، واستنباط بعض المؤشرات الميدانية من خلال الصور الفضائية. إن الهدف الأساسي من هذا الفصل هو تقديم قراءة تحليلية معمقة لواقع البحيرة، مدعمة بالخرائط التحليلية التي تترجم القيم الرقمية إلى تمثيلات مكانية.

2.3. حساب المؤشرات الفضائية

. مؤشر الكلوروفيل (NDCI)

من خلال مراجعة خرائط مؤشر الكلوروفيل لبحيرة الوادي، خلال شهر مارس من كل عام بين 2018 و2025 (الصورة رقم07)، يمكن ملاحظة أنماط وتغيرات مميزة في تركيز الكلوروفيل: (Mishra & Mishra, 2012)

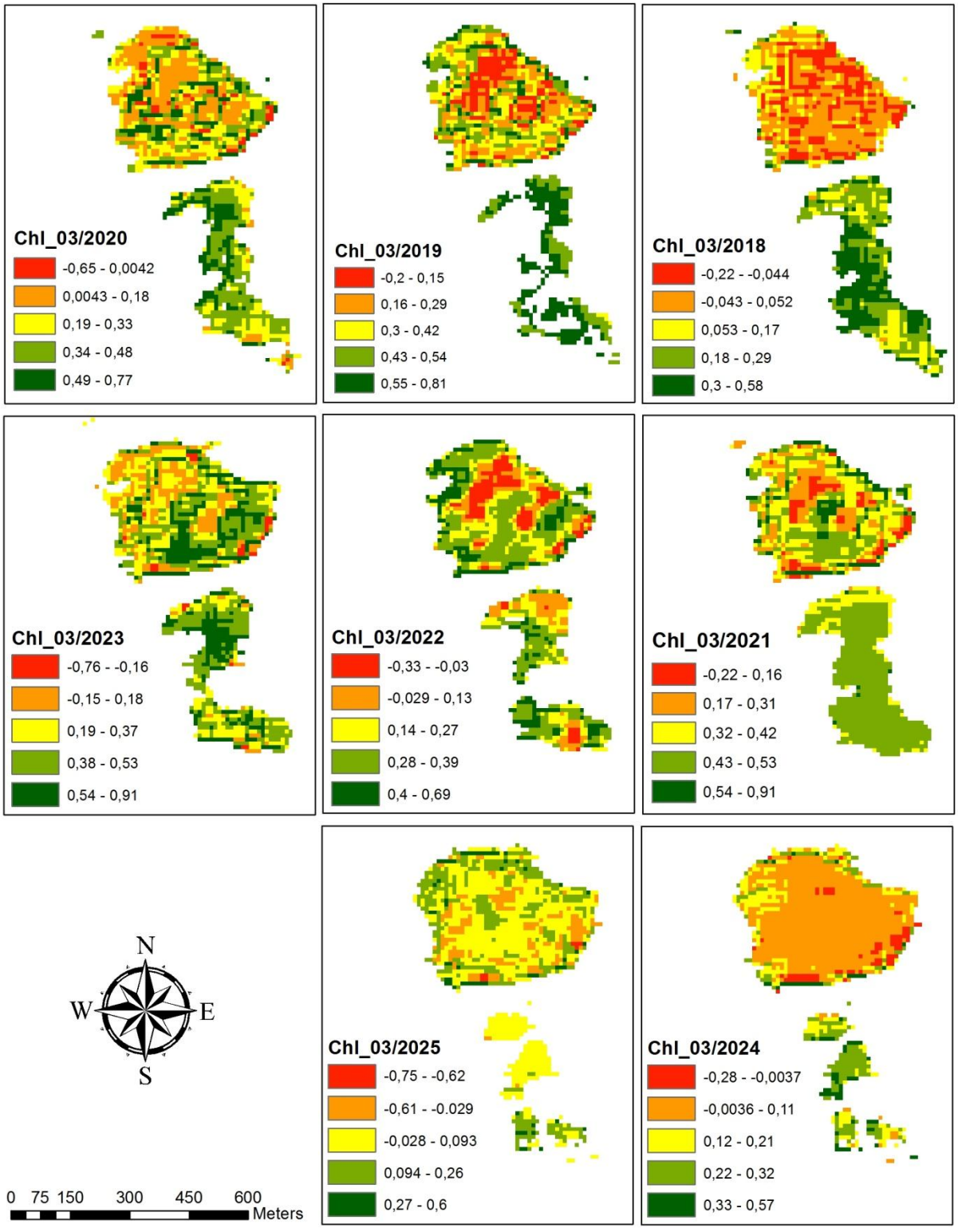
- 2018: تظهر خرائط مارس 2018 مستويات متفاوتة من الكلوروفيل، حيث تتراوح القيم من -0.22 إلى 0.58. كانت هناك مناطق ذات تركيزات منخفضة (الألوان الحمراء والبرتقالية) منتشرة في أجزاء من البحيرة، بينما كانت المناطق ذات التركيزات المتوسطة إلى العالية (الألوان الخضراء

والصفراء) موجودة أيضًا، مما يشير إلى بداية نشاط طحلبي في بعض الأجزاء.

- 2019: شهد عام 2019 زيادة ملحوظة في تركيزات الكلوروفيل مقارنة بعام 2018، حيث تراوحت القيم من -0.2 إلى 0.81. لوحظ انتشار أوسع للمناطق ذات التركيزات العالية (الألوان الخضراء الداكنة) في جميع أنحاء البحيرة، مما يشير إلى ازدهار طحلبي أكثر كثافة وتوسعًا في هذا العام.
- 2020: في مارس 2020، استمرت مستويات الكلوروفيل في الارتفاع في بعض المناطق، مع قيم تتراوح من -0.65 إلى 0.77. كانت هناك مناطق واسعة تظهر تركيزات عالية جدًا من الكلوروفيل، مما يشير إلى استمرار الازدهار الطحلبي أو تفاقمه في أجزاء معينة من البحيرة (Matthews, 2011)
- 2021: شهد عام 2021 أعلى متوسط لقيم الكلوروفيل خلال الفترة المدروسة، حيث تراوحت القيم من -0.22 إلى 0.91. كانت المناطق ذات التركيزات العالية جدًا (الأخضر الداكن) هي السائدة في معظم أنحاء البحيرة، مما يشير إلى ازدهار طحلبي واسع النطاق ومكثف بشكل خاص في هذا العام. هذا الارتفاع قد يكون له تأثيرات بيئية كبيرة على النظام المائي للبحيرة.
- 2022: بعد الذروة في عام 2021، شهد مارس 2022 انخفاضًا في مستويات الكلوروفيل، حيث تراوحت القيم من -0.33 إلى 0.69. على الرغم من أن المستويات لا تزال مرتفعة في بعض المناطق، إلا أن هناك تراجعًا واضحًا في انتشار وشدة الازدهار الطحلبي مقارنة بالعام السابق.
- 2023: في عام 2023، لوحظ ارتفاع طفيف في متوسط قيم الكلوروفيل مقارنة بعام 2022، مع قيم تتراوح من -0.76 إلى 0.91. يشير هذا إلى عودة النشاط الطحلبي للارتفاع بعد الانخفاض المؤقت، مما يدل على استمرار الظروف المواتية لنمو الطحالب في البحيرة.

- 2024: شهد مارس 2024 انخفاضًا آخر في مستويات الكلوروفيل، حيث تراوحت القيم من -0.28 إلى 0.57. تظهر الخرائط مناطق أقل كثافة من الازدهار الطحلبي، مما يشير إلى تحسن نسبي في جودة المياه من حيث تركيز الكلوروفيل.
- 2025: في عام 2025، لوحظ انخفاض حاد ومفاجئ في متوسط قيم الكلوروفيل، حيث تراوحت القيم من -0.75 إلى 0.6. الأهم من ذلك، أن مساحة المسطح المائي الظاهرة في الخرائط قد تقلصت بشكل كبير، مما يشير إلى انخفاض كبير في حجم المياه في البحيرة. هذا الانخفاض في مساحة المياه، بالإضافة إلى انخفاض الكلوروفيل، قد يشير إلى ظروف جفاف شديدة أو تغيرات هيدرولوجية كبيرة أثرت على البحيرة. قد يكون انخفاض الكلوروفيل نتيجة مباشرة لتقلص حجم المياه وتغير الظروف البيئية التي لم تعد مواتية لنمو الطحالب بنفس الكثافة السابقة.

يُظهر تحليل مؤشر الكلوروفيل (NDCI) لبحيرة الوادي بين مارس 2018 ومارس 2025 تقلبات كبيرة في تركيزات الطحالب، مع ذروة في عام 2021 وانخفاض حاد في عام 2025 تزامنًا مع تقلص كبير في مساحة البحيرة. تُشير هذه الاتجاهات إلى أن البحيرة تتعرض لضغوط بيئية، ربما بسبب الجريان السطحي للمغذيات، وتغيرات في درجات الحرارة، والأهم من ذلك، تغيرات في مستوى المياه.


Chl_03/2020
-0,65 - 0,0042
0,0043 - 0,18
0,19 - 0,33
0,34 - 0,48
0,49 - 0,77
Chl_03/2019
-0,2 - 0,15
0,16 - 0,29
0,3 - 0,42
0,43 - 0,54
0,55 - 0,81
Chl_03/2018
-0,22 - -0,044
-0,043 - 0,052
0,053 - 0,17
0,18 - 0,29
0,3 - 0,58
Chl_03/2023
-0,76 - -0,16
-0,15 - 0,18
0,19 - 0,37
0,38 - 0,53
0,54 - 0,91
Chl_03/2022
-0,33 - -0,03
-0,029 - 0,13
0,14 - 0,27
0,28 - 0,39
0,4 - 0,69
Chl_03/2021
-0,22 - 0,16
0,17 - 0,31
0,32 - 0,42
0,43 - 0,53
0,54 - 0,91
N
W
E
S
Chl_03/2025
-0,75 - -0,62
-0,61 - -0.029
-0,028 - 0,093
0,094 - 0,26
0,27 - 0,6
Chl_03/2024
-0,28 - -0,0037
-0,0036 - 0,11
0,12 - 0,21
0,22 - 0,32
0,33 - 0,57
0 75 150 300 450 600
Meters

الصورة 06: تطور مؤشر الكلوروفيل لبحيرة الوادي (شهر مارس، سنوات 2018 إلى 2025).

التحليل الفضائي يوضح أن صور الأقمار الصناعية، خاصة عند التحليل الزمني (عبر عدة سنوات)، يمنح رؤية واضحة للتغيرات الديناميكية في جودة وتغيرات المياه السطحية، الأمر الذي يسمح بتحديد الفترات الحرجة التي تستدعي تدخلات بيئية أو إجراءات إدارة مستدامة للبحيرة .كما أن التوزيع المكاني للمؤشر الكلوروفيل يبرز الحاجة إلى مراقبة مستمرة، حيث أن التغيرات قد تكون موضعية وليست متجانسة على كامل المسطح المائي.

3.2.3. مؤشر العكارة (NDTI)

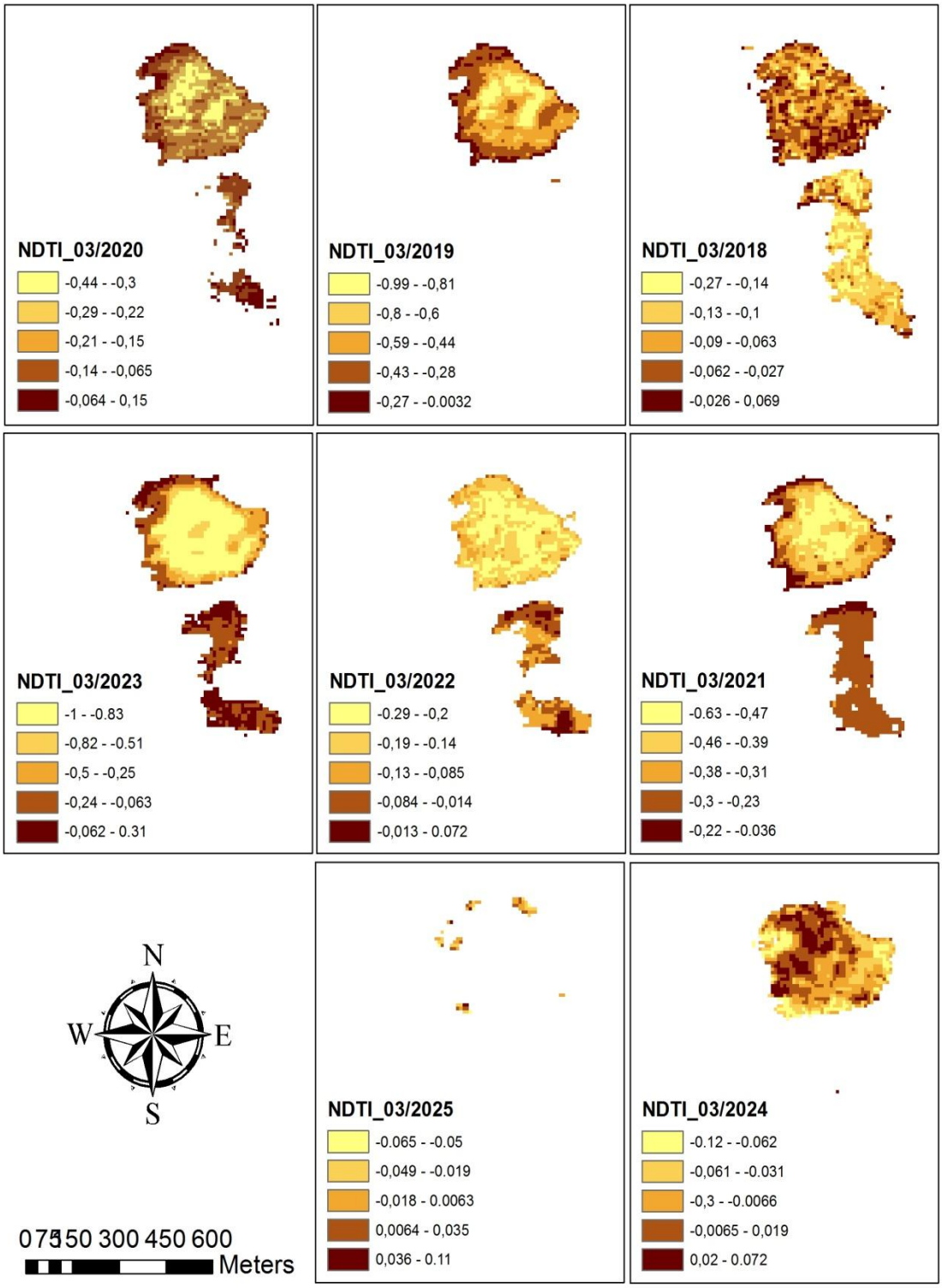
أولاً، من المهم أن نفهم ما يمثله هذا المؤشر. مؤشر فرق العكارة الطبيعي (NDTI) الموضح في الصورة رقم 08 هو مقياس يستخدم لتقييم جودة المياه ووضوحها. يتم حسابه باستخدام بيانات الأقمار الصناعية، وتحديداً الفرق في الانعكاس بين الضوء الأزرق والأحمر. تشير القيم الإيجابية المرتفعة إلى عكارة أعلى (مياه أقل صفاءً)، بينما تشير القيم السلبية إلى عكارة أقل (مياه أكثر صفاءً). يمكن أن تنتج العكارة عن وجود جزيئات عالقة مثل الطمي والطحالب والمخلفات الصناعية (Dogliotti et al., 2015)

من خلال تحليل سلسلة الخرائط لتطور العكارة في بحيرة الوادي (مارس 2018 - مارس 2025)، يمكننا ملاحظة التغيرات التالية في عكارة البحيرة خلال شهر مارس من كل عام:

- 2018: تظهر الخريطة مستويات عكارة منخفضة إلى متوسطة في معظم أنحاء البحيرة، مع تركيز أعلى قليلاً في الأجزاء الشمالية. تتراوح قيم المؤشر بشكل أساسي بين -0.27 و0.069.
- 2019: هناك زيادة ملحوظة في العكارة مقارنة بعام 2018، خاصة في الجزء الرئيسي من البحيرة. تتراوح القيم من -0.99 إلى -0.0032، مما يشير إلى وجود مناطق ذات صفاء عالٍ جدًا وأخرى ذات عكارة مرتفعة.

- 2020: تستمر مستويات العكارة المرتفعة، مع انتشارها في مناطق أوسع من البحيرة. تتراوح القيم من -0.44 إلى 0.15.
- 2021: تظهر الخريطة انخفاضًا طفيفًا في العكارة مقارنة بعامي 2019 و 2020، ولكنها لا تزال أعلى من مستويات عام 2018. تتراوح القيم من -0.63 إلى -0.036.
- 2022: يبدو أن هناك انخفاضًا إضافيًا في العكارة، حيث تعود أجزاء كبيرة من البحيرة إلى اللون الأصفر الفاتح الذي يشير إلى مياه أكثر صفاءً. تتراوح القيم من -0.29 إلى 0.072.
- 2023: تعود العكارة للارتفاع بشكل كبير، وتغطي معظم أجزاء البحيرة. تتراوح القيم من -1 إلى 0.31، وهي أوسع نطاق للقيم في السلسلة بأكملها، مما يشير إلى تباين كبير في صفاء المياه.
- 2024: تظهر الخريطة انخفاضًا حادًا في العكارة، حيث تعود معظم أجزاء البحيرة إلى اللون الأصفر الفاتح. تتراوح القيم من -0.12 إلى 0.072.
- 2025: يبدو أن مساحة المسطح المائي قد انخفضت بشكل كبير، مع وجود بقع صغيرة فقط من المياه ذات العكارة المنخفضة. تتراوح القيم من -0.065 إلى 0.11.

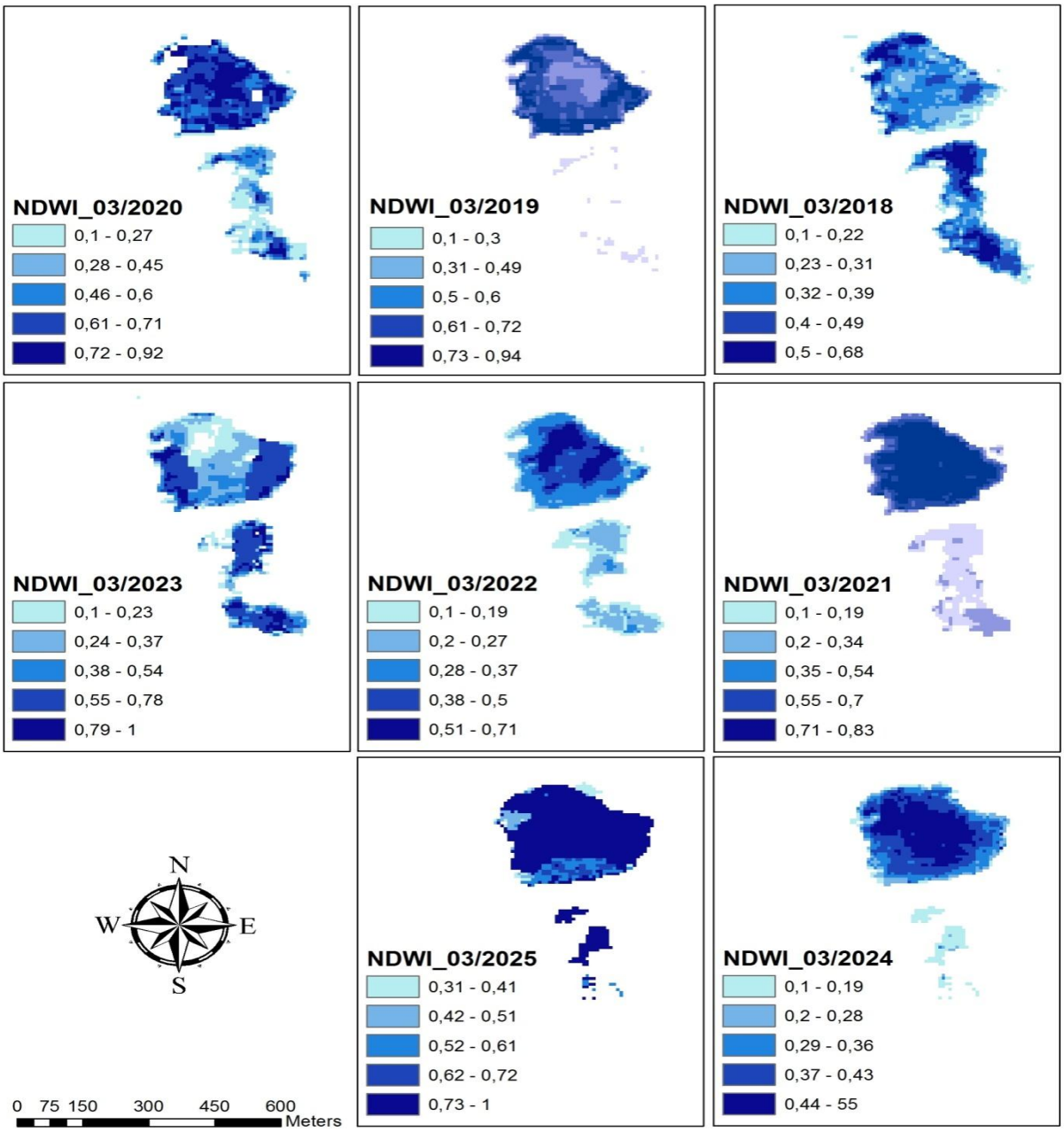
بشكل عام، تُظهر البيانات في الصورة رقم 08 تقلبات كبيرة في مستويات العكارة في بحيرة الوادي من عام لآخر. يبدو أن هناك اتجاهًا نحو زيادة العكارة في الفترة ما بين 2019 و2023، مع بعض الانخفاضات المؤقتة. قد يكون هذا مرتبطًا بعوامل مثل زيادة الترسيب، أو نمو الطحالب، أو الجريان السطحي من المناطق المحيطة . الانخفاض الحاد في مساحة المياه في عام 2025 هو تطور مثير للقلق وقد يشير إلى ظروف جفاف أو زيادة في استهلاك المياه.



الصورة 07: تطور مؤشر العكارة لبحيرة الوادي (شهر مارس، سنوات 2018 إلى 2025)

1.2.3. مؤشر المياه (NDWI)

الصورة رقم 08 تمثل سلسلة زمنية لمؤشر الفرق المائي الطبيعي (NDWI) خلال شهر مارس من الأعوام 2018 إلى 2025، وتُظهر التوزيع المكاني لقيم NDWI لمنطقة البحيرة خلال ثماني سنوات (McFeeters, 1996)



الصورة 08: تطور مؤشر المياه لبحيرة الوادي (شهر مارس، سنوات 2018 إلى 2025).

يعكس مؤشر NDWI مدى وجود المياه السطحية، حيث تمثل القيم الأعلى (باللون الأزرق الداكن) مناطق ذات محتوى مائي مرتفع، في حين تشير القيم الأقل (باللون الأزرق الفاتح) إلى مناطق جافة أو ذات محتوى مائي منخفض.

يُعد مؤشر الفرق المائي الطبيعي (NDWI) أداة فعّالة لرصد التغيرات في الغطاء المائي السطحي عبر الزمن باستخدام بيانات الاستشعار عن بعد. تعتمد هذه الدراسة على تحليل مكاني وزماني لمؤشر NDWI في شهر مارس من الأعوام 2018 إلى 2025، بهدف تتبع ديناميكية توزيع المياه في المنطقة المدروسة.

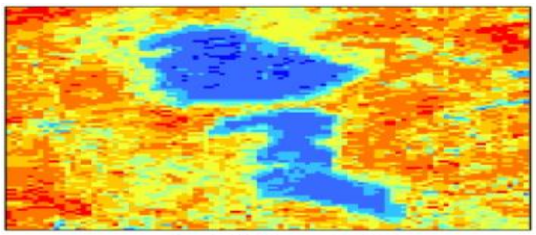
- 2018: تُظهر الخريطة في عام 2018 تنوعًا في قيم NDWI، حيث تتراوح بين 0.1 إلى 0.68، ما يشير إلى تواجد مسطحات مائية بمستويات متفاوتة.
- في 2019، تُلاحظ زيادة عامة في قيم المؤشر، وخاصة في الجزء الشمالي من المنطقة، حيث ارتفعت القيم إلى ما بين 0.5 – 0.94، مما يدل على ارتفاع نسبي في وفرة المياه خلال هذه الفترة.
- عام 2020 يشهد استمرارًا في ارتفاع قيم NDWI، وخاصة في الجزء الشمالي، ما قد يُعزى إلى تحسن الظروف المناخية أو زيادة الهطول المطري.
- أما في 2021، فتُلاحظ بداية تراجع في القيم في بعض المناطق الجنوبية، وهو ما قد يدل على بداية مرحلة انخفاض في الموارد المائية السطحية.
- يبرز عام 2022 كأحد السنوات ذات الانخفاض الواضح في قيم NDWI، حيث تُظهر الخريطة انخفاضًا ملحوظًا في مستويات المياه في معظم أجزاء المنطقة.
- في 2023، يستمر الاتجاه التنازلي، مع تسجيل أدنى القيم بين 0.1 و0.23 في بعض المناطق، ما يشير إلى حالة جفاف أو نقص حاد في الموارد المائية.
- تظهر بيانات عام 2024 تحسنًا طفيفًا في قيم NDWI، خاصة في الجزء الشمالي من المنطقة، مما قد يعكس بداية استعادة جزئية للمياه.

- في عام 2025، تُسجل مجددًا (حتى 1.0)، خصوصًا في المنطقة الشمالية .

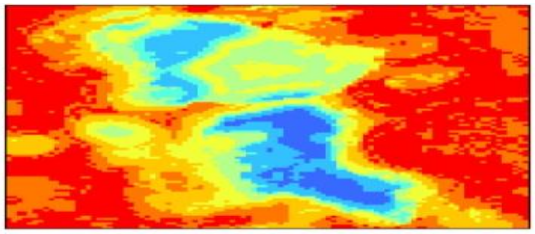
لوحظ وجود نمط دوري للتغير في مؤشر NDWI، حيث ارتفعت القيم خلال الفترة 2018–2020، تلتها مرحلة من الانخفاض (2021–2023)، ثم استعادة تدريجية بدءًا من 2024. تُظهر الخرائط تباينًا مكانيًا واضحًا في توزيع المياه، حيث تُعتبر المناطق الشمالية أكثر غنى بالمياه مقارنة بالمناطق الجنوبية.

4. مؤشر درجة الحرارة (Land Surface Temperature - LST)

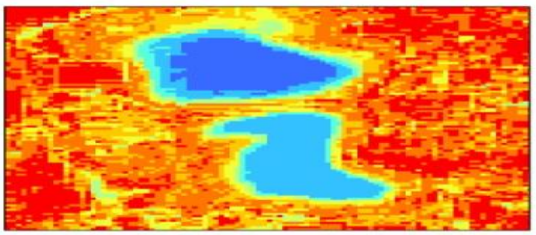
الصورة رقم 09 تمثل التغيرات الزمنية في درجة حرارة سطح الأرض (LST: Land Surface Temperature) خلال شهر مارس من عام 2018 إلى 2025. توضح الخرائط النمط المكاني والزماني لدرجة الحرارة السطحية عبر الأعوام، باستخدام تدرجات لونية تبدأ من الأزرق (الأبرد) وصولاً إلى الأحمر (الأشد حرارة). تمثل درجة حرارة سطح الأرض (LST) مؤشرًا حيويًا يُستخدم في دراسة التغيرات المناخية، والبيئية، والهيدرولوجية، حيث تؤثر على عمليات التبخر، والإجهاد الحراري للنباتات، وتوزيع المياه السطحية. يعتمد هذا التحليل على صور الاستشعار عن بعد التي توضح التوزيع الحراري لسطح الأرض خلال شهر مارس عبر فترة تمتد من 2018 حتى 2025. (Weng, 2009)



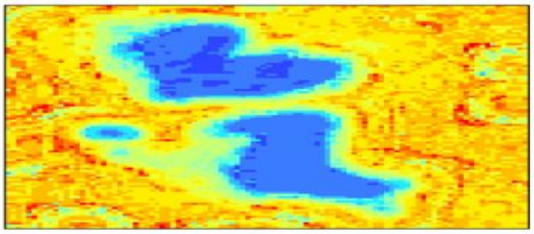
LST_Mars 2019
High : 24
Low : 0



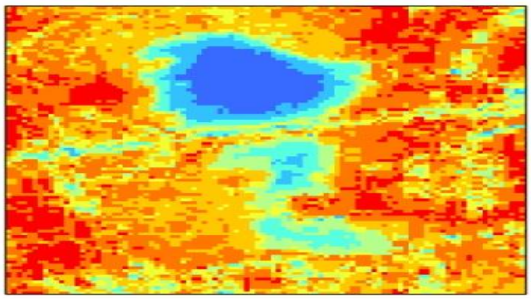
LST_Mars 2018
High : 23
Low : 0



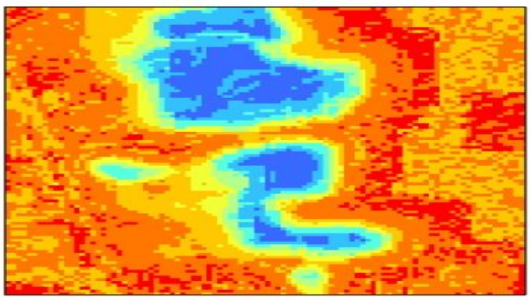
LST_Mars 2021
High : 24
Low : 0



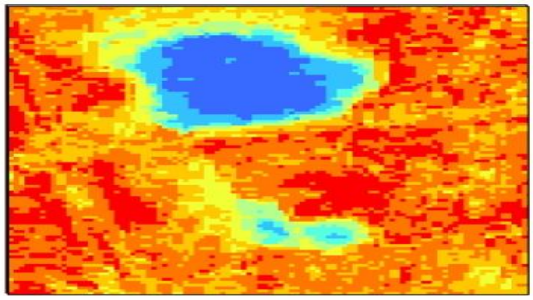
LST_Mars 2020
High : 32
Low : 0



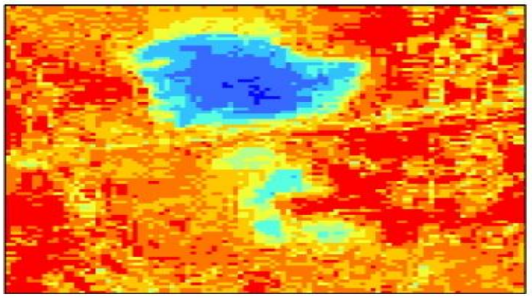
LST_Mars 2023
High : 25
Low : 0



LST_Mars 2022
High : 23
Low : 0



LST_Mars 2025
High : 25
Low : 0



LST_Mars 2024
High : 25
Low : 0

0 140280 560 840 1 120
Meters

الصورة09: تغيرات الحرارة من 2018 الى 2025

- **2018 و2019:** تُظهر الخرائط درجات حرارة معتدلة نسبيًا، حيث تتراوح القيم القصوى بين 23°C و24°C. تبرز المناطق المائية بلون أزرق، في حين أن المناطق المحيطة تتدرج نحو الأصفر والبرتقالي، مما يشير إلى حرارة متوسطة.
- **2020:** يُسجل ارتفاع ملحوظ في درجة الحرارة السطحية لتصل إلى 32°C، ما يمثل تغيرًا حراريًا مفاجئًا مقارنة بالسنوات السابقة. قد يكون هذا الارتفاع نتيجة لموجة حرارية أو تغير في ظروف الغطاء النباتي والمائي.
- **2021 و2022:** تعود درجات الحرارة إلى المعدلات المسجلة في الأعوام السابقة (23–24°C)، وتُظهر المناطق المائية استمرارًا في الاحتفاظ بدرجات حرارة منخفضة (باللون الأزرق)، في حين تُحيط بها مناطق دافئة بدرجات حرارة أعلى.
- **2023:** تُسجل درجة حرارة قصوى 25°C، مع احتفاظ النمط المكاني بشكل مشابه للسنوات السابقة، مما يدل على نوع من الاستقرار الحراري النسبي في المنطقة المدروسة.
- تُظهر الخرائط لعامي 2024 و2025 استمرارًا لدرجات الحرارة المرتفعة نسبيًا (25°C)، مع وضوح المسطحات المائية بدرجات حرارة منخفضة، مما يعكس الفارق الحراري الطبيعي بين اليابسة والماء.

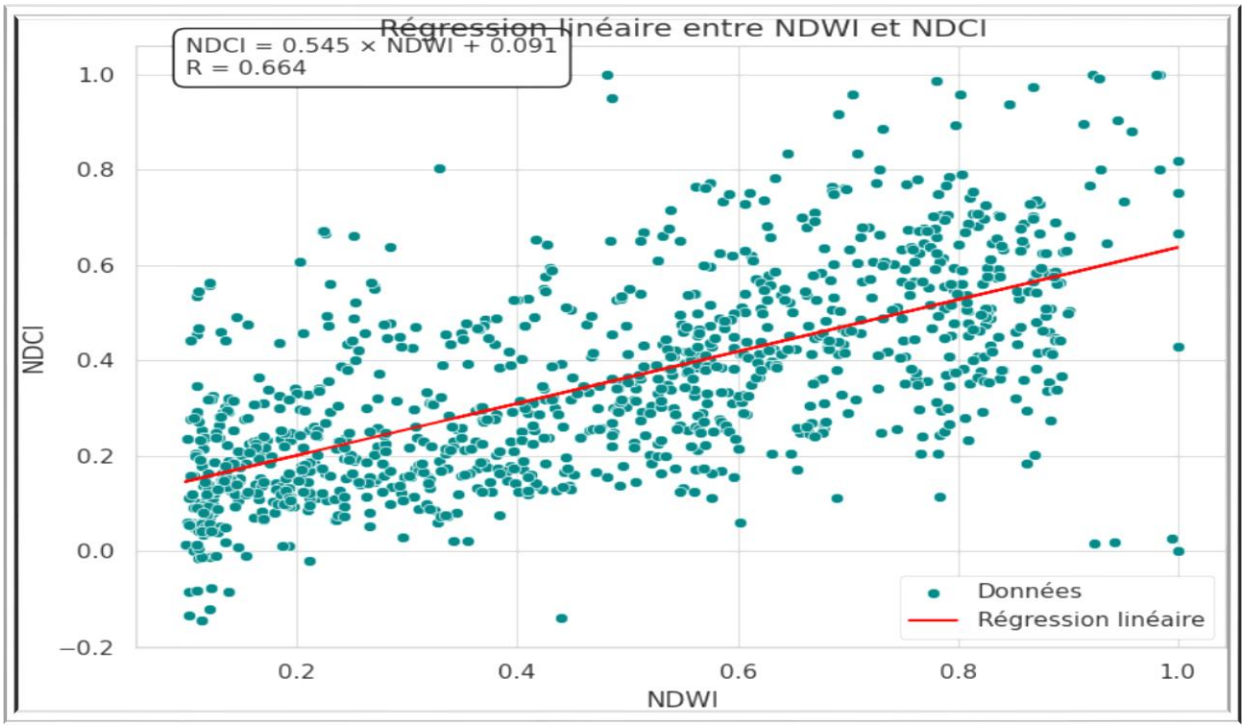
يشير التوزيع المكاني لدرجات الحرارة إلى أن المناطق الجنوبية والجنوبية الشرقية أكثر تأثرًا بارتفاع درجات الحرارة، وهو ما قد يكون مرتبطًا بتغيرات في الغطاء الأرضي (مثل ازدياد المناطق العمرانية أو الجافة). لوحظ وجود فارق حراري واضح بين المسطحات المائية (الباردة) والمناطق اليابسة (الدافئة)، ما يُعزز دور الغطاء المائي في تعديل حرارة المنطقة. عام 2020 يُعد استثنائيًا من حيث الارتفاع الحراري، مما يستدعي الدراسة لمعرفة أسبابه المناخية أو البشرية المحتملة.

تشهد الفترة ما بين 2021–2025 استقرارًا نسبيًا في القيم الحرارية العليا مع استمرار وجود مناطق ذات حرارة مرتفعة، وهو ما قد يشير إلى تأثيرات التغير المناخي أو التحضر المستمر في بعض أجزاء المنطقة.

يعكس تحليل درجة حرارة سطح الأرض خلال شهر مارس من الأعوام 2018–2025 تغيرات حرارية ملحوظة، أبرزها الارتفاع الحاد في عام 2020، واستقرار نسبي في السنوات اللاحقة. تؤكد البيانات أهمية مراقبة درجة حرارة سطح الأرض لفهم الأنماط المناخية المحلية، وتقييم تأثير العوامل الطبيعية والبشرية على البيئة.

5. العلاقة بين المؤشرين NDWI وNDCI باستخدام الانحدار الخطي

يُستخدم مؤشر NDWI لتقدير محتوى المياه السطحية، بينما يُعتبر NDCI مؤشرًا حساسًا لتركيز الكلوروفيل (الصورة10)، ويُستخدم عادةً لتقييم الإنتاجية البيولوجية أو نوعية المياه في البيئات المائية. يُمكن أن تشير العلاقة بين المؤشرين إلى التفاعل بين الغطاء المائي والكتلة البيولوجية في البيئة المدروسة، مما يوفّر معلومات بيئية مهمة.



الصورة 10: رسم بياني يوضح العلاقة بين NDWIوNDCI

يوضح الشكل 10 تحليل الانحدار الخطي بين NDWI وNDCI، وقد تم الحصول عليه باستخدام المعادلة التالية(المعادلة 4):

$$NDCI = 0.545 \times NDWI + 0.091 \ldots\ldots (4)$$

كما تم تسجيل معامل ارتباط خطّي (Pearson's R) قدره: $R = 0.664$

يشير المعامل الموجب في معادلة الانحدار (0.545) إلى وجود علاقة طردية بين NDWI وNDCI، حيث تؤدي زيادة محتوى المياه (NDWI) إلى ارتفاع محتمل في مؤشر الكلوروفيل (NDCI)، مما قد يعكس ارتفاع تركيز الكتلة الحية في البيئات المائية.

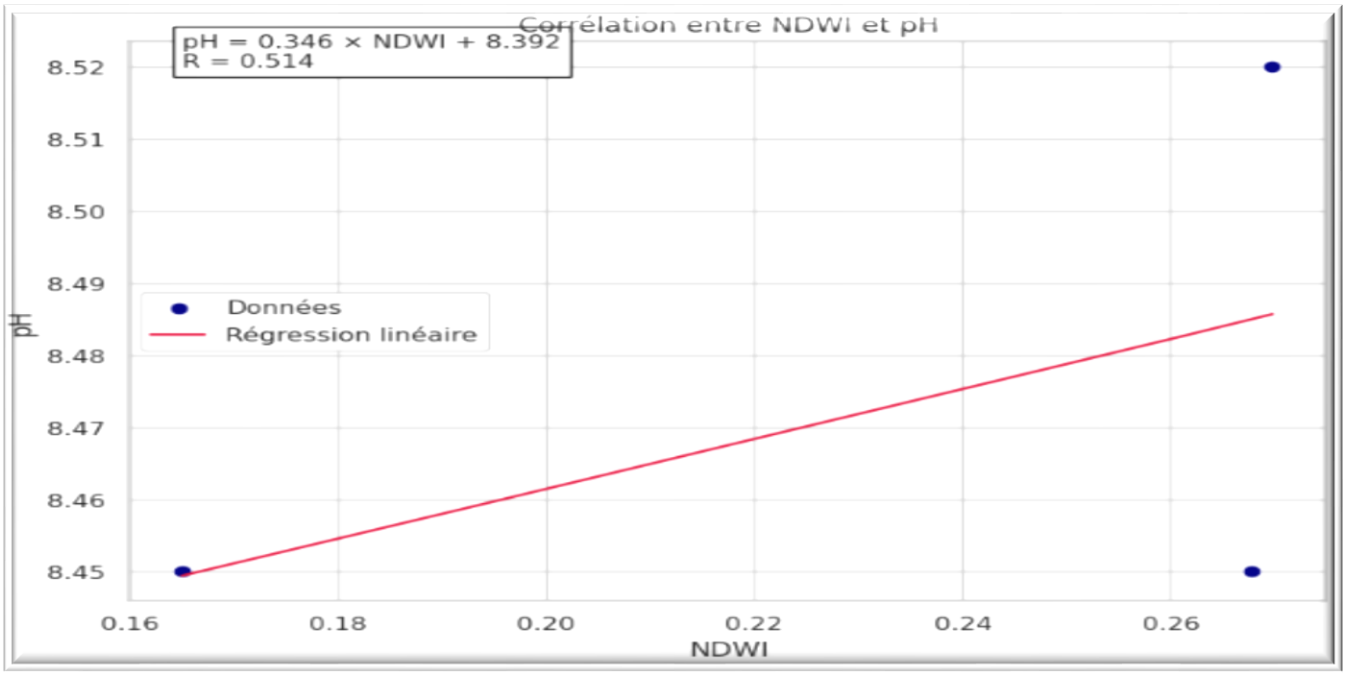
قيمة $R = 0.664$ تدل على ارتباط متوسط إلى قوي، مما يُشير إلى أن جزءًا كبيرًا من التباين في NDCI يمكن تفسيره بواسطة قيم NDWI.

يُمكن تفسير هذه العلاقة بأن المناطق ذات المحتوى المائي المرتفع تُوفر بيئة مناسبة لنمو الطحالب أو النباتات المائية، ما يؤدي إلى ارتفاع تركيز الكلوروفيل. مع ذلك، يُلاحظ وجود تشتت في بعض القيم حول خط الانحدار، مما يعني أن هناك عوامل أخرى قد تؤثر في NDCI (مثل جودة المياه، المغذيات، أو الأنشطة البشرية).

تُظهر نتائج الانحدار الخطي وجود علاقة طردية واضحة بين NDWI وNDCI، حيث يمكن استخدام NDWI كمؤشر مساعد على التنبؤ بالتغيرات في NDCI ضمن البيئات المائية. تؤكد هذه العلاقة التكامل بين المؤشرين في تقييم الحالة البيئية، لا سيما في ما يتعلق بتفاعلات الماء والنشاط البيولوجي.

6. العلاقة بين المؤشرين NDWIوpH:

الرسم البياني في الصورة 11 يعرض العلاقة بين مؤشر المياه المعياري (NDWI) كمتحول مستقل (المحور الأفقي) ودرجة الحموضة (pH) كمتحول تابع (المحور العمودي).



الصورة 11: رسم بياني يوضح العلاقة بين NDWI وpH

تمثل النقاط الزرقاء البيانات المرصودة، بينما يمثل الخط الأحمر معادلة الانحدار الخطي (Régression linéaire)، المعادلة رقم 5.

معادلة الانحدار الظاهرة:

$$pH = 0.346 \times NDWI + 8.392 \ldots\ldots\ldots (5)$$

معامل الارتباط (R) يساوي 0.514.

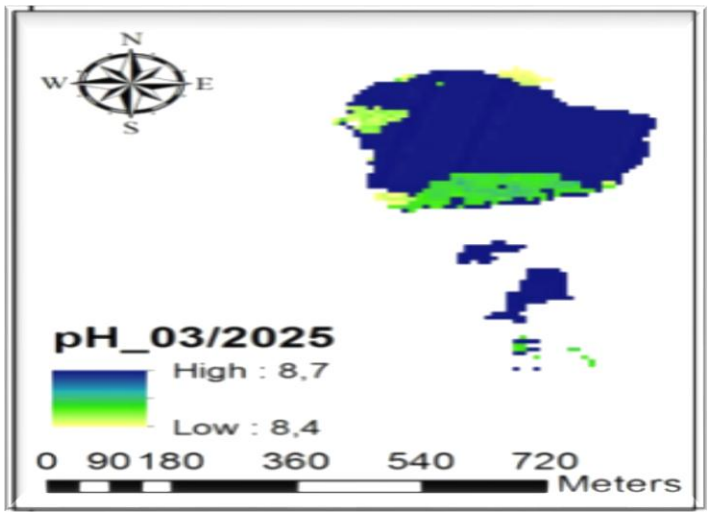
ميل الخط الموجب (+0.346): يشير إلى وجود علاقة طردية بين NDWI و pH. أي كلما ارتفع مؤشر NDWI (الذي يعكس محتوى المياه أو رطوبة السطح)، يرتفع معه مستوى pH بشكل طفيف.

المقطع (8.392): يمثل قيمة pH المتوقعة عندما يكون NDWI = 0.

معامل الارتباط R = 0.514 يشير إلى علاقة متوسطة القوة بين NDWI وpH.

العلاقة ليست قوية جداً لكنها موجودة وإيجابية. NDWI يقيس رطوبة المياه أو محتوى الماء في الغطاء الأرضي/النباتي أو المسطحات المائية. PH هو مؤشر كيميائي يحدد درجة الحموضة/القلوية للمياه. العلاقة الإيجابية تعني أن زيادة محتوى الماء أو توفره (NDWI مرتفع) يقترن بارتفاع قيمة pH (أي المياه تميل أن تكون أقل حمضية). قد يفسَّر ذلك بيئياً بأن وجود مياه أكثر أو مناطق أكثر رطوبة يساهم في تخفيف الملوحة أو التراكيز الحمضية، ما يرفع pH. ومع ذلك، يبقى الارتباط متوسطاً، ما يستدعي إدخال مؤشرات أخرى (مثل الملوحة، المواد العضوية، درجة الحرارة) لتحليل أكثر شمولية.

الصورة 12 تمثل تجسيدا للمعادلة رقم 5، حيث تم حساب درجة الحموضة لسنة 2025 انطلاقا من معطيات ميدانية لسنة 2022، وهذا بالاستعانة بالنموذج الموضح في المعادلة 5.



الصورة 12: مؤشر الحموضة (pH) لسنة 2025.

الخريطة الموضحة في الصورة 12 تُمثل التوزيع الجغرافي لقيم درجة الحموضة (pH) في منطقة الدراسة خلال شهر مارس 2025. الخريطة تُظهر وسطًا قاعديًا متجانسًا نسبيًا، مع فروق طفيفة بين المناطق الداخلية (أكثر قلوية) والمناطق

الحدودية (أقل قلوية). هذا التوزيع يرتبط على الأرجح بالعوامل الطبيعية المسيطرة (الدوران المائي، التهوية، التبخر) وقد يشير إلى نظام بيئي مستقر نسبيًا، مع الحاجة لمراقبة دورية لرصد أي تغيرات مستقبلية.

القيم تتراوح بين 8.4 و8.7.

- اللون الأخضر الفاتح = قيم منخفضة نسبيًا (pH ≈ 8.4).
- اللون الأزرق الداكن = قيم مرتفعة نسبيًا (pH ≈ 8.7).

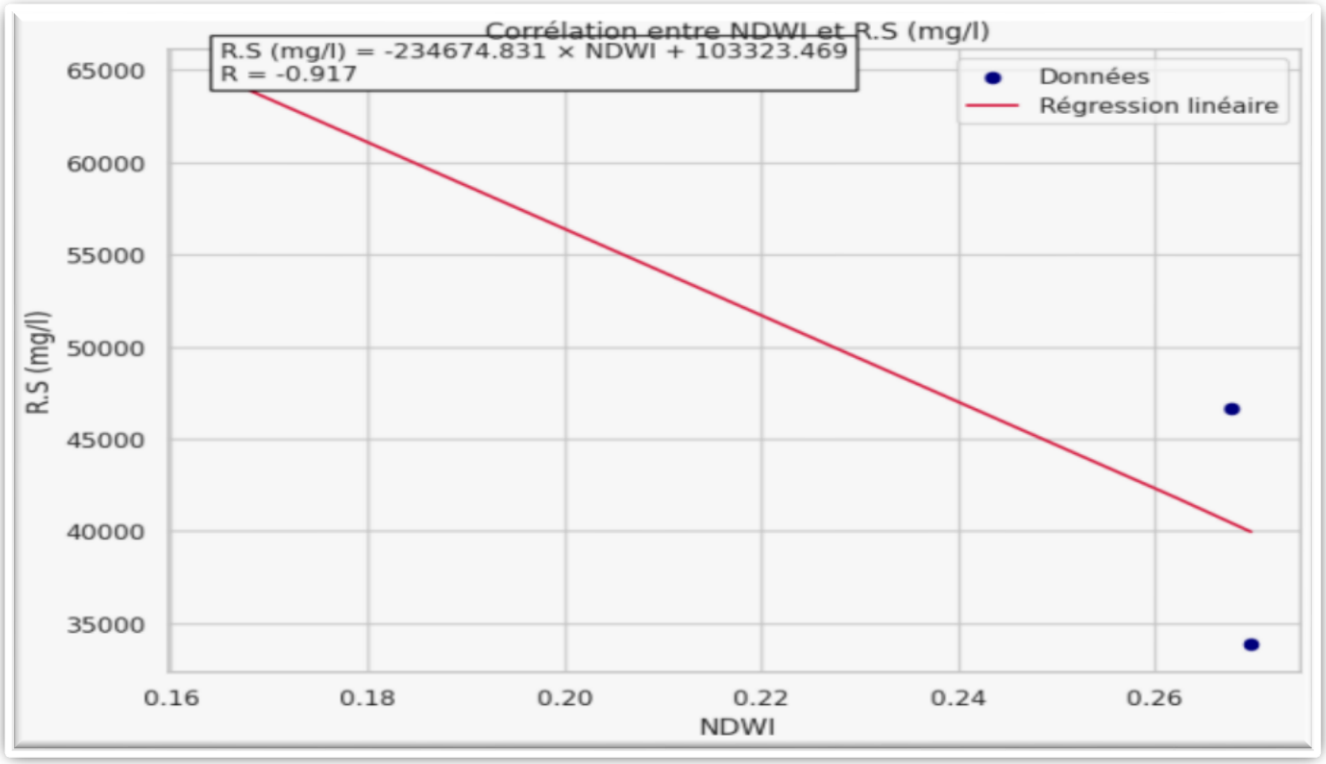
جميع القيم تقع في المجال القلوي (أعلى من 7)، مما يشير إلى أن الوسط المدروس ليس حامضيًا بل مائل للقلوية. قيم pH القلوية تدل غالبًا على:

- انخفاض في النشاط الحمضي (قلة الملوثات أو الأمطار الحمضية).
- احتمال وجود تراكيز مرتفعة من الكربونات والبيكربونات، أو نشاط بيولوجي (كالطحالب) الذي يستهلك CO_2 مما يرفع pH.
- التوزيع المكاني يُبرز تأثير العمليات الطبيعية (مثل التهوية أو اختلاط المياه) وربما تأثير بشري محدود (مثل الصرف أو الأنشطة الزراعية المحيطة).

هذه النتائج تؤكد أهمية استخدام المؤشرات المكانية (NDWI) لمتابعة التغيرات البيئية ورصد جودة المياه عبر الزمن.

7. استنتاج R.S باستخدام NDWI

الصورة 13 توضح العلاقة العكسية بين مؤشر المياه والأملاح الذائبة (RS), NDWI (Normalized Difference Water Index) على المحور الأفقي، وهو مؤشر يعكس محتوى المياه أو رطوبة الوسط و(mg/l) R. S على المحور العمودي، وهو تركيز الأملاح الذائبة الكلية في المياه.



الشكل 13: العلاقة بين NDWI وR. S

تم تمثيل البيانات بالنقاط الزرقاء، مع تطبيق انحدار خطي (الخط الأحمر); ومعادلة الانحدار) المعادلة 6) مبينة كما يلي:

$$R.S = -234674.831 \times NDWI + 103323.469 \ldots\ldots (6)$$

ومعامل الارتباط: $R = -0.917$ يعبّر عن ارتباط عالٍ جدًا وسالب والعلاقة تكاد تكون خطية واضحة بين المؤشرين.

الميل السلبي الكبير (-234674.831): يدل على أن العلاقة عكسية قوية جدًا بين NDWI و R.S. أي كلما ارتفع مؤشر NDWI (زيادة المياه/الرطوبة)، انخفضت قيم الأملاح الذائبة.

منطقيًا، ارتفاع NDWI يعني توفر المياه بشكل أكبر، وهو ما يؤدي عادة إلى تخفيف تراكيز الأملاح الذائبة (dilution effect). في المقابل، انخفاض NDWI

(أي قلة المياه/الجفاف) يؤدي إلى ارتفاع تراكيز الأملاح الذائبة بسبب التبخر وقلة التخفيف. هذه النتائج تعكس أن NDWI يمكن أن يكون مؤشرًا غير مباشر لملوحة المياه.

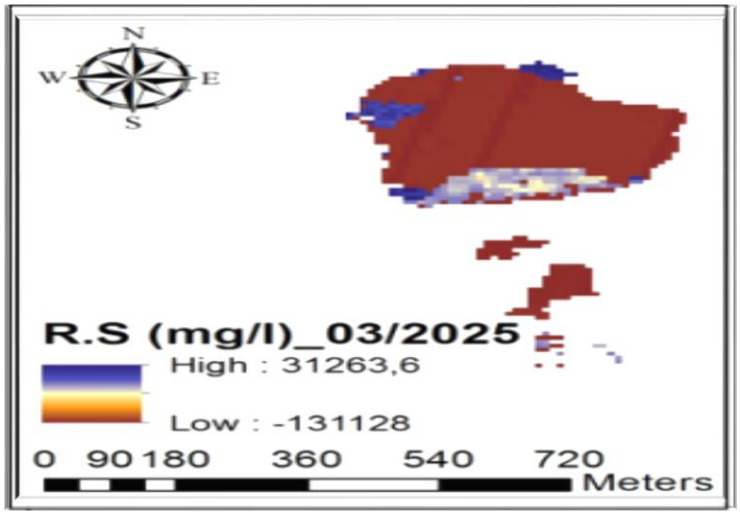
العلاقة العكسية القوية تؤكد وجود ارتباط هيدرولوجي – كيميائي بين توفر المياه ومستويات الملوحة. NDWI يمكن أن يستخدم كأداة استشعار عن بعد لمراقبة جودة المياه، خصوصًا في المناطق التي تعاني من مشاكل الملوحة.

النتائج تبرز أن زيادة الموارد المائية أو تحسين التدفقات المائية يساهم في خفض الملوحة، والعكس صحيح.

وعليه، نستنتج بأن زيادة NDWI (أي ارتفاع محتوى المياه) يؤدي إلى انخفاض ملحوظ في تركيز الأملاح الذائبة. هذا الترابط يؤكد أن الملوحة مرتبطة بشكل وثيق بالظروف الهيدرولوجية، ويمكن متابعة تغيرها عبر مؤشرات الاستشعار عن بعد.

توضح نتائج الانحدار الخطي أن مؤشر NDWI يعد أداة فعّالة في رصد التغيرات في تراكيز الأملاح الذائبة، حيث يظهر ارتباط عكسي قوي بينهما. ارتفاع محتوى المياه يؤدي إلى تخفيف الملوحة، بينما الانخفاض في NDWI يقترن بارتفاع تركيز الأملاح. هذه العلاقة تُبرز أهمية دمج مؤشرات الاستشعار عن بعد في تقييم نوعية المياه وإدارة الموارد المائية.

الخريطة 14 تمثل التوزيع المكاني لتركيز الأملاح الذائبة (R.S) في المياه بوحدة ملغم/لتر (mg/l) لشهر مارس 2025. حيث يظهر اختلاف التراكيز بين مناطق الدراسة وفقاً لمقياس لوني متدرج من الأزرق (القيم المنخفضة) إلى الأصفر/الأحمر (القيم المرتفعة).



الصورة 14: التوزيع المكاني للاملاح الذائبة (لشهر مارس2025)

القيم العليا في لصورة 14 بلغت نحو 31263.6 mg/l وهو تركيز مرتفع جداً يشير إلى ملوحة عالية. القيم الدنيا وصلت إلى -131128 mg/l، وهذه قيمة غير منطقية علمياً (سالبة)، قد تعود إلى خطأ في المعالجة الرقمية للبيانات أو في معادلة الاستشعار عن بُعد. المساحات ذات اللون الأحمر الداكن تمثل التراكيز الأعلى للأملاح الذائبة، مما يدل على مناطق تعاني من ملوحة شديدة قد تكون مرتبطة بتبخر مرتفع، أو طبيعة جيولوجية مالحة، أو تأثير مياه جوفية مالحة. المساحات ذات اللون الأزرق تمثل أقل القيم، وتشير إلى مناطق أكثر نقاءً نسبياً.

تركز القيم المرتفعة في الأجزاء الشمالية والشمالية الغربية، في حين تتركز القيم المتوسطة والمنخفضة في مناطق محدودة متفرقة.

ارتفاع الملوحة في مناطق واسعة يشير إلى مخاطر بيئية مثل:

- تدهور نوعية المياه.

- تأثير سلبي على صلاحية المياه للاستخدام الزراعي أو البشري.
- احتمالية تملح التربة وانخفاض إنتاجيتها.

القيم الشاذة السالبة قد تكون نتيجة:

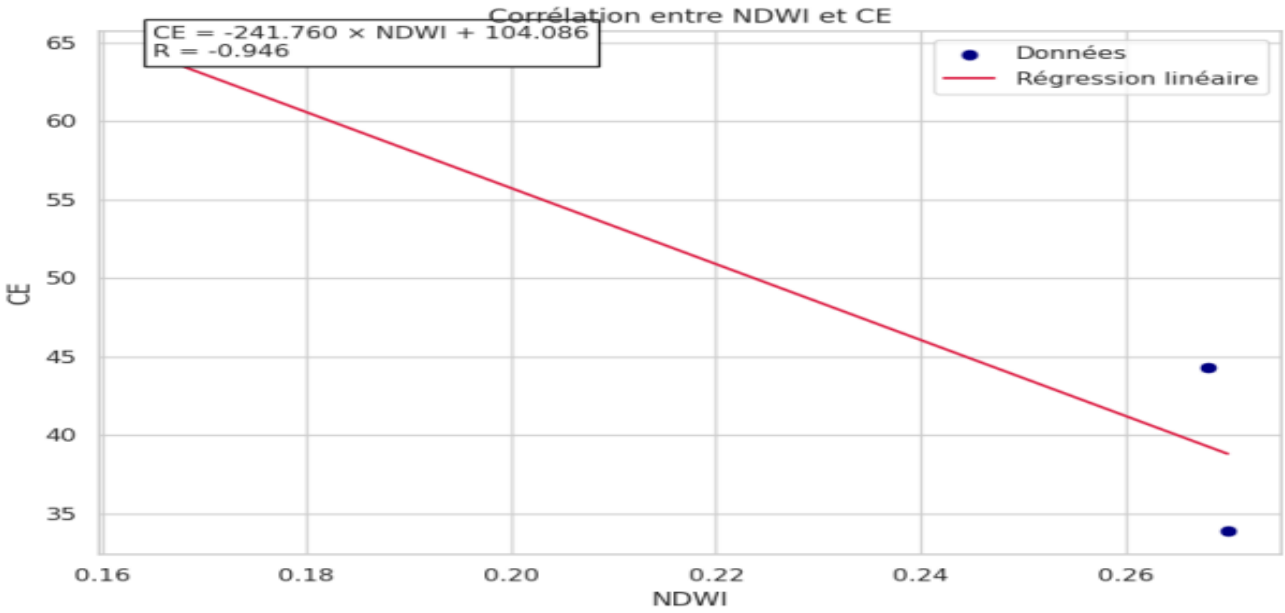
- أخطاء في المعايرة أو التحويل الطيفي.
- استخدام نموذج رياضي يحتاج إلى مراجعة.
- خلل في إدخال البيانات أو نقص في المعطيات الميدانية.

المناطق المرتفعة الملوحة ($\leq$ 30000 mg/l) تقترب من مستويات ملوحة مياه البحر، مما يوحي إما بتداخل مياه البحر في الخزانات الجوفية (وهو بالأمر المستبعد) أو بوجود تكوينات ملحية جيولوجياً (فرضية مقبولة). التباين المكاني الواضح قد يعكس طبيعة جيومورفولوجية مختلفة، حيث تعمل المنخفضات كمصائد للأملاح.

في الخلاصة، الخريطة 14 توضح تبايناً مكانياً كبيراً في تركيز الأملاح الذائبة لشهر مارس 2025، مع تسجيل قيم مرتفعة جداً في أجزاء واسعة مما يعكس خطورة بيئية ومائية محتملة، غير أن القيم السالبة تشير إلى ضرورة إعادة التحقق من المعالجة الرقمية للبيانات قبل اعتماد النتائج النهائية.

8. حساب الناقلية الكهربائية CE من خلال NDWI:

الرسم في الصورة 15 يمثل العلاقة الارتباطية بين مؤشر المياه المشتق من صور الاستشعار عن بُعد (NDWI) وبين الموصلية الكهربائية للمياه (CE)، وهي مؤشر ميداني مباشر لملوحة المياه. المحور الأفقي (X) يمثل قيم NDWI والمحور الرأسي (Y) يمثل قيم CE (µS/cm).



الصورة 15: الرسم البياني يوضح العلاقة بين NDWI و CE

النقاط الزرقاء تمثل المعطيات الميدانية المقاسة والخط الأحمر يمثل معادلة الانحدار الخطي. معادلة الانحدار (المعادلة 7):

$$CE=-241.760\times NDWI+104.086 \ldots\ldots\ldots\ldots (7)$$

معامل الارتباط : $R=-0.946$

- ملاحظة: (تأخذ القيم السالبة بالقيمة المطلقة في هذه المعادلة)

الميل السالب (-241.76) يدل على علاقة عكسية قوية بين NDWI و**CE**، أي كلما ارتفع NDWI (زيادة محتوى المياه) انخفضت الموصلية الكهربائية (انخفاض الملوحة). معامل الارتباط (R = -0.946) يشير إلى قوة ارتباط عالية جداً (قريبة من -1) مما يعني أن NDWI يعد مؤشراً فعالاً للتنبؤ بتغير الملوحة في المياه.

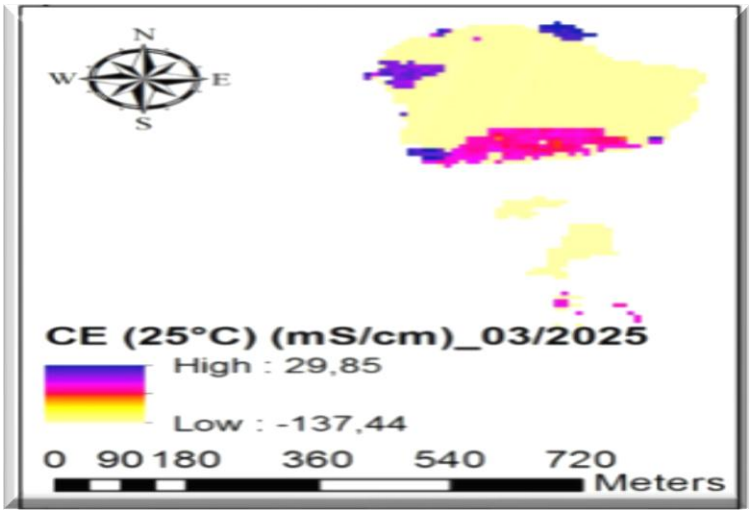
- ارتفاع قيم NDWI يعكس وفرة المياه العذبة (انخفاض الملوحة).

- انخفاض قيم NDWI يقترن بارتفاع الملوحة (زيادة CE)، مما قد يكون ناتجاً عن تداخل مياه مالحة، تبخر مرتفع، أو قلة التغذية المائية.
- هذا الترابط يؤكد أن الاستشعار عن بعد (عبر NDWI) يمكن أن يكون أداة فعالة: لمراقبة نوعية المياه وخاصة ملوحتها.
- إدارة الموارد المائية: استخدام NDWI كمؤشر استباقي لتحديد مناطق ارتفاع الملوحة.
- الرصد البيئي: متابعة تطور ملوحة البحيرات والخزانات المائية زمنياً باستخدام صور الأقمار الصناعية.
- الزراعة: التنبؤ بالمناطق المهددة بتملح التربة نتيجة ارتفاع CE.

التحليل الإحصائي للرسم يبين وجود علاقة خطية عكسية قوية بين NDWI و**CE** بمعامل ارتباط ($R = -0.946$). هذا يدل على أن زيادة محتوى المياه (كما يظهر في NDWI) ترتبط مباشرة بانخفاض الملوحة (CE). النتائج تؤكد أهمية مؤشرات الاستشعار عن بعد في تقييم ورصد جودة المياه، وتفتح المجال لاستخدامها في التخطيط المائي ومكافحة مخاطر تملح التربة.

الصورة 16 توضح التوزيع المكاني لقيم الموصلية الكهربائية CE للمياه عند درجة حرارة قياسية (C°25) بوحدة mS/cm خلال شهر مارس 2025.

- الحد الأعلى: 29.85 mS/cm (يمثل ملوحة مرتفعة جداً).
- الحد الأدنى: -137.44 mS/cm (ملوحة منخفظة جدا)
- التدرج اللوني يتراوح من الأصفر (قيم منخفضة) إلى البنفسجي/الأحمر (قيم مرتفعة).



الصورة 16: التوزيع المكاني لقيم الموصلية الكهربائية CE للمياه

الأجزاء الجنوبية الشرقية للخريطة تظهر بلون أصفر فاتح، مما يعكس قيم CE منخفضة وبالتالي مياه أقل ملوحة نسبياً. الأجزاء الجنوبية والشمالية الشرقية تضم مناطق ذات ألوان بنفسجية وزهرية، أي قيم CE مرتفعة مما يشير إلى مستويات عالية من الملوحة. بعض البقع الصغيرة جداً ذات الألوان الداكنة قد تمثل مواقع شديدة الملوحة أو قد تكون ناتجة عن ضوضاء مكانية في البيانات.

ارتفاع CE (≥ 29 mS/cm) يشير إلى:

- مياه عالية الملوحة وغير صالحة للشرب أو الزراعة.
- قد يكون السبب تداخل مياه جوفية مالحة أو تأثير مباشر لتبخر مرتفع.

هذه المناطق مهددة بخطر تملح التربة وتدهور الغطاء النباتي.

القيم المنخفضة (باللون الأصفر):

- تعكس مياه أكثر نقاءً وصلاحية نسبية للاستخدام.
- غالباً ما ترتبط بمناطق تغذية مائية أو تواجد مياه سطحية عذبة نسبياً.

القيم السالبة: وهذا بسبب طبقة السحب او خطأ راديومتري على مستوى القمر الصناعي وبالتالي قد تكون هناك قيم سالبة، وهذا قد يأثر على النتائج البحث المراد اخذها في هذه الدراسة وتأخذ القيم السالبة بالقيمة المطلقة.

الصورة 16 تبين تبايناً مكانياً واضحاً في ملوحة المياه، حيث توجد مناطق ذات ملوحة مرتفعة تشكل تهديداً بيئياً وزراعياً. يمكن اعتبار الموصلية الكهربائية CE مؤشراً عملياً لرصد نوعية المياه باستخدام الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية.

غير أن وجود قيم سالبة يستلزم إعادة تدقيق المعالجة الرقمية للبيانات، وإجراء تصحيح إحصائي قبل اعتماد النتائج.

في هذه الحالة، إعادة المعايرة والتحقق من البيانات للتخلص من القيم غير المنطقية، وإجراء تحليل زمني لمقارنة التغير في CE بين السنوات السابقة واللاحقة لتحديد اتجاهات الملوحة. التحقق الحقلي (Ground truthing) من خلال جمع عينات ميدانية لمطابقة النتائج المستخلصة من الاستشعار عن بعد. كذلك، إعداد خرائط تقييم زراعي لتحديد صلاحية الأراضي المعرضة للتملح.

الخريطة المكانية لمعامل الموصلية الكهربائية لشهر مارس 2025 تكشف عن وجود مناطق ذات ملوحة عالية وأخرى منخفضة، مع تسجيل قيم شاذة سالبة تستلزم التدقيق. وتبرز النتائج أهمية دمج بيانات الاستشعار عن بعد مع القياسات الحقلية لضمان دقة التفسير، مما يعزز دور هذه الخرائط في إدارة الموارد المائية وتقييم المخاطر البيئية.

9. الخـاتـمة:

يُبرز هذا الفصل أهمية توظيف تقنيات الاستشعار عن بُعد والتحليل المكاني–الزماني في دراسة نوعية المياه ومتابعة التغيرات البيئية في بحيرة الوادي خلال الفترة (2018–2025). فقد أظهرت المؤشرات الطيفية المدروسة (NDWI، NDCI، NDTI، LST، CE، R.S، pH) تباينات مكانية وزمنية واضحة، عكست ديناميكية النظام البيئي للبحيرة وتأثره بالظروف المناخية والعوامل البشرية.

لقد بينت النتائج وجود فترات من الوفرة المائية ترافقت مع ارتفاع مؤشرات النشاط البيولوجي (كالكلوروفيل)، تلتها مراحل من التراجع والجفاف النسبي، وهو ما انعكس مباشرة على ملوحة المياه وخصائصها الكيميائية والفيزيائية. كما أثبتت التحاليل الإحصائية قوة العلاقة بين بعض المؤشرات (مثل NDWI وCE أو NDWI وR.S)، الأمر الذي يعزز إمكانية اعتماد الاستشعار عن بُعد كأداة فعّالة في التنبؤ بالتغيرات النوعية للمياه.

غير أنّ تسجيل بعض القيم الشاذة (سالبة أو غير منطقية) يؤكد ضرورة دمج المعالجة الرقمية مع التحقق الحقلي لضمان مصداقية النتائج (قلة المعطيات الميدانية). ومن ثم، فإن استخدام هذه المنهجية التكاملية يفتح آفاقاً لتطبيقات عملية في إدارة الموارد المائية، خاصة في البيئات الهشة والمعرضة لمخاطر التملح أو الجفاف.

وعليه، يمكن القول إن هذا الفصل وفر قراءة تحليلية شاملة لواقع البحيرة، وساهم في إبراز التحديات البيئية الراهنة، إلى جانب تقديم مؤشرات يمكن البناء عليها مستقبلاً في صياغة استراتيجيات مستدامة لحماية وإدارة الموارد المائية.

الخاتمة العامة

تمثل هذه التجربة العملية العلمية استخدام تقنيات الاستشعار عن بعد، وخاصة صور الأقمار الصناعية Sentinel-2، في مراقبة جودة المياه ببحيرة الوادي. انطلقت الدراسة من عرض شامل بالبحث، حيث تم التعريف بالمنطقة الجغرافية والهيدرولوجية والبيئية للبحيرة، إضافة إلى الإطار المناخي والبشري الذي يحيط بها.

في الفصل الثاني، تم عرض النماذج العلمية المعتمدة، والتي ارتكزت على مجموعة من المؤشرات الطيفية المشتقة من صور Sentinel-2، مثل مؤشر الكلوروفيل، مؤشر NDWI، مؤشر العكارة (العكر)، ودرجة حرارة المياه. وقد أُرفق ذلك بشرح تفصيلي لمبادئ هذه المؤشرات، وأسس اختيارها، ودورها في الكشف عن الكمي والوعي عن بداية النظام البيئي للبحيرة.

الفصل الثالث، فقد تم تحليل النتائج الميدانية والفضائية، حيث أن المعالجة الرقمية لصور الأقمار الصناعية أظهرت تغيرات ملحوظة في بعض المؤشرات، مما أدى إلى توضيح ديناميكية المياه في البحيرة إثر عوامل طبيعية وبشرية. في هذه الدراسة تمكنا من استنتاج عدة مؤشرات ميدانية، انطلاقا من تحليل مؤشر المياه NDWI، مثل pH، CE وRS.

من بين النقائص والعوائق التي صادفناها في فترة اعداد هذه المذكرة هي قلة المعطيات الميدانية المتحصل عليها. حيث لم نتمكن إلا على الحصول

على ثلاث عينات ميدانية من مجموع 15 عينة وهذا راجع إلى وجود بقية العينات خارج نطاق الصور الفضائية.

تؤكد النتائج المتحصل عليها أن دمج الصور الطيفية من الأقمار الصناعية مع المعطيات الميدانية يمثل أداة فعالة ودقيقة لمراقبة جودة المياه واستنباطها، خاصة في البيئات الجافة وشبه الجافة مثل بحيرة الوادي. كما تبرز هذه الدراسة أهمية الاعتماد على تقنيات الاستشعار عن بعد كحلول بديلة وإدارة مستدامة لدعم تبني الابتكار في مجال الموارد المائية.

قائمـــة المراجـع

-Beggas Y., 1992 : Contribution à l'étude bioécologique des peuplements Orthopterologiques dans la région d'El Oued – régime alimentaire d'Ochrilidiatibilis. Mémoire Ing. Agro., Insti. Nati. Agro. El Harrach, 53p.

-Hillisse Y, (2007) - Encyclopédie des plantes de la région d'Oued Souf Ed. El-Walide ; El-Oued ; 302p

-Tamma Mohammed et Brahim Yacine. (2024). Analyse Et Détermination Qualitative Des Eaux Des Nappes Aquifères De La Région D'El-Oued. Mémoire de Master en Hydraulique, option : Ouvrages hydrauliques. Université d'El Oued, 2024.

-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.

-Mishra, S., & Mishra, D. R. (2012). Normalized Difference Chlorophyll Index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. Remote Sensing of Environment, 117, 394–406.

-Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., et al. (2012). Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. Remote Sensing of Environment, 120, 25–36

-Google Earth Engine

المرجع: Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., et al. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment, 202, 18–27

-Dekker, A. G., Malthus, T. J., Wijnen, M. M., & Seyhan, E. (1996). Remote sensing as a tool for assessing water quality in lakes and coastal waters

-Matthews, M. W. (2011). A current review of empirical procedures of remote sensing in water quality assessment. International Journal of Remote Sensing, 32(21), 6855–6899

-Weng, Q. (2009). Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends.

algorithm -Dogliotti, A. I., Ruddick, K., Nechad, B., et al. (2015). A single to retrieve turbidity from remotely sensed data in all coastal and estuarine waters. Remote Sensing of Environment, 156, 157–168.

-Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). Remote Sensing and Image Interpretation (7th ed.). Wiley.

-Koponen, S., Pulliainen, J., Kallio, K., & Hallikainen, M. (2002). Lake water quality classification with airborne hyperspectral spectrometer and simulated MERIS data. Remote Sensing of Environment, 79(1), 51–59.