تكامل تقنيات الاستشعار عن بعد والنمذجة الإحصائية لتقدير الجهد الأكسدي الاختزالي (ORP): دراسة حالة في المنطقة المصبية لنهر الكبير الشمالي

د. م. عاصم احمد خطيب* د. مهند أمين حسن**

الملخص

يُعدّ الجهد الأكسدي الاختزالي (ORP) من المؤشرات الأساسية لتقييم جودة المياه في البيئات المصبية الساحلية، إلا أن القياسات الميدانية المنتظمة لهذا المتغير تبقى محدودة من حيث التغطية المكانية والزمنية. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم إمكانية توظيف بيانات القمر الصناعي Sentinel-2، بالتكامل مع النمذجة الإحصائية التجريبية، لتقدير التوزع المكاني لقيم ORP في المنطقة المصبية لنهر الكبير الشمالي خلال موسم الجفاف. تم تنفيذ رحلة بحرية لجمع قياسات ORP، ومن ثم تم ربطها بالقيم والنسب الطيفية المستخرجة من صور Sentinel-2. بعد ذلك تم إجراء مجموعة من التحليلات الإحصائية لتحديد المتغيرات الطيفية الأكثر ارتباطاً بقيم ORP، ثم تم تطوير واختبار أداء مجموعة من النماذج الإحصائية الأحادية والمتعددة المتغيرات باستخدام صيغ خطية وغير خطية.

أظهرت النتائج أن النسب الطيفية، وبشكل خاص G/B وR/B، تمتلك قدرة تفسيرية أعلى لتغيرات ORP مقارنة بالنطاقات الطيفية الفردية. كما أظهر النموذج الخطي متعدد المتغيرات القائم على دمج النسب الطيفية G/B وNIR/B أفضل أداء، محققا معامل تحديد بلغ 0.57 مع أخطاء تقدير مقبولة (RMSE=6.7mV وMAE=6.0mV). وأتاح تطبيق هذا النموذج إنتاج خريطة للتوزع المكاني لقيم ORP، أظهرت تدرجاً واضحاً من ظروف مختزلة في المياه النهرية عند المصب إلى ظروف أكثر أكسدة باتجاه المياه البحرية المفتوحة.

أشارت نتائج هذه الدراسة إلى أن دمج بيانات الاستشعار عن بعد متعددة الأطياف مع النمذجة الإحصائية يُمثل أداة فعالة لدعم مراقبة ORP في البيئات المصبية الساحلية، خاصة في المناطق التي تعاني من محدودية القياسات الميدانية المنتظمة، كما يسهم في تحسين فهم الديناميكيات البيوجيوكيميائية للمياه الساحلية.

الكلمات المفتاحية: الاستشعار عن بعد، Sentinel-2، الجهد الأكسدي الاختزالي، جودة المياه، الإحصاء البيئي، النمذجة الإحصائية.

* مدرس في قسم الهندسة الطبوغرافية – كلية الهندسة المدنية – جامعة اللاذقية – اللاذقية – سورية.
✉ assem.khatib@latakia-univ.edu.sy
** مدرس في قسم الفيزياء البحرية – المعهد العالي للبحوث البحرية – جامعة اللاذقية – اللاذقية – سورية.
✉ mouhannad.amin.hassan@latakia-univ.edu.sy

Integrating Remote Sensing Techniques and Statistical Modeling to Estimate Oxidation–Reduction Potential (ORP): A Case Study of the Al-Kabir Al-Shamali Estuary

Dr. Eng Assem Khatib* Dr. Mouhannad Hassan**

Abstract

Oxidation–reduction potential (ORP) is a key indicator for assessing the water quality in coastal estuarine environments; however, intensive field-based measurements of ORP remain limited in both spatial and temporal coverage. This study aims to evaluate the potential of Sentinel-2 satellite data, integrated with empirical statistical modeling, to estimate the spatial distribution of ORP values in the estuarine zone of the Al-Kabir Al-Shamali River during the dry season. A field-based marine survey was conducted to collect in situ ORP measurements, which were subsequently linked to spectral reflectance values and spectral ratios derived from Sentinel-2 imagery. A series of statistical analyses was then performed to identify the spectral variables most strongly correlated with ORP, followed by the development and performance evaluation of a set of univariate and multivariate statistical models using both linear and non-linear formulations.

The results demonstrate that spectral ratios, particularly G/B and R/B, exhibit higher explanatory power for ORP variability compared to individual spectral bands. The multivariate linear model combining the G/B and NIR/B ratios achieved the best performance, yielding a coefficient of determination of 0.57 with acceptable estimation errors (RMSE=6.7mV and MAE=6.0mV). The application of this optimal model enabled the generation of a spatial distribution map of ORP values, revealing a clear gradient from reducing

conditions in riverine waters near the estuary to more oxidizing conditions in the open marine environment.
The findings of this study indicate that integrating multispectral remote sensing data with empirical statistical modeling represents an effective approach for supporting ORP monitoring in coastal estuarine environments, particularly in regions with limited regular field measurements, and contributes to a more comprehensive understanding of coastal water biogeochemical dynamics.

Keywords: Remote sensing, Sentinel-2, Oxidation-reduction potential, Water Quality, Environmental statistics, Statistical modeling.

* Assistant Professor, Department of Topographic Engineering, Faculty of Civil Engineering, Latakia University, Latakia, Syria.
✉ assem.khatib@latakia-univ.edu.sy
** Assistant Professor, Department of Marin physics, High Institute of Marine Research, Latakia University, Latakia, Syria.
✉ mouhannad.amin.hassan@latakia-univ.edu.sy

1 مقدمة

تُعدّ مصبات الأنهار من أكثر البيئات المائية ديناميكية، إذ تتميز بتداخل قوي بين المياه العذبة النهرية والمياه البحرية المالحة، ما يؤدي إلى نشوء تدرجات حادة في الخصائص الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية، تنعكس بشكل مباشر على جودة المياه وبنية النظم البيئية الساحلية. ويجعل هذا التداخل المصبات نظماً بيئية شديدة الحساسية للتغيرات الطبيعية والضغوط البشرية، بما في ذلك التصريفات الصحية والزراعية والصناعية، والتقلبات الهيدرولوجية الموسمية، الأمر الذي يفرض تحديات كبيرة أمام عمليات الرصد والتقييم البيئي المستمر [1].

يُعدّ الجهد الأكسدي الاختزالي (Oxidation–Reduction Potential, ORP) أحد البارامترات الكيميائية الأساسية التي تعكس الحالة الديناميكية للتفاعلات الأكسدية والاختزالية في البيئات المصبّية. إذ يلعب ORP دوراً محورياً في التحكم بمصير العديد من العناصر

الكيميائية والملوثات، من خلال تأثيره المباشر على سلوك المعادن الثقيلة وترسيبها أو إعادة ذوبانها، وكذلك على تحرر المغذيات، مثل الفوسفور، من الرواسب في الظروف المختزلة [2].

أظهرت دراسة [3] أن ارتفاع قيم ORP يرتبط بزيادة تركيز الأكسجين المذاب، ما يجعله مؤشراً فعالاً لتوصيف عمليات التلبد (Flocculation) وانتقال المواد العالقة في مناطق التداخل بين المياه النهرية والمياه البحرية. في المقابل، ترتبط قيم ORP المنخفضة بظروف مختزلة قد تؤدي إلى زيادة السمية البيئية، ونقص الأكسجين، وتدهور النظم البيئية الساحلية، مما يعزز من أهمية هذا البارامتر في تقييم جودة المياه وقدرة المصبات على التنقية الذاتية [4].

تعتمد الطرائق التقليدية لرصد ORP على قياسات ميدانية مباشرة باستخدام أقطاب كهروكيميائية مرجعية، تتيح تقديراً فورياً ودقيقا للحالة الأكسدية الاختزالية للوسط المائي [6] ,[5]. وعلى الرغم من الدقة المرتفعة لهذه الطرائق، إلا أنها تعاني من محدودية التغطية المكانية والزمانية وارتفاع الكلفة التشغيلية، وبشكل خاص في البيئات الساحلية المعقدة مثل مصبات الأنهار [7]. وقد أدى ذلك إلى تنامي الاهتمام باستخدام تقنيات الاستشعار عن بعد كأداة داعمة لبرامج الرصد البيئي، نظراً لقدرتها على توفير بيانات متعددة الأطياف، واسعة النطاق، ومتكررة زمنيا، يمكن توظيفها لاستخلاص مؤشرات طيفية مرتبطة بخصائص المياه الفيزيائية والكيميائية.

تستند تطبيقات الاستشعار عن بعد في تقييم جودة المياه بشكل أساسي إلى أساليب النمذجة الإحصائية التجريبية، حيث يتم تطوير علاقات كمية بين الانعكاسية الطيفية للمياه في النطاقات متعددة الأطياف والقيم المقاسة ميدانياً لبارامترات جودة المياه. وتسمح هذه النماذج بربط التغيرات الطيفية للمياه بعمليات بيئية وبيوجيوكيميائية معقدة، مما يجعلها أداة فعالة لتقدير خصائص المياه في المناطق التي يصعب فيها إجراء قياسات ميدانية كثيفة أو مستمرة [9] ,[8].

نظراً لتوافرها المجاني من جهة، ولامتلاكها خصائص مكانية وطيفية متميزة من جهة أخرى، تُعدّ صور الأقمار الصناعية Sentinel-2 من أبرز بيانات الاستشعار عن بعد المستخدمة في طيف واسع من التطبيقات البيئية والمكانية. فقد تم استخدامها، على سبيل المثال، بالتكامل مع نظم المعلومات الجغرافية في رسم خرائط المناطق المبنية ومراقبة التوسع العمراني ,[10]

[11]، وكذلك في رسم خرائط البيوت المحمية البلاستيكية [12]. كما أثبتت العديد من الدراسات الحديثة فاعلية المؤشرات الطيفية المستخرجة من صور Sentinel-2 في تقدير البارامترات النشطة بصرياً مثل الكلوروفيل، المواد العالقة، والمواد الذائبة الملونة [13] ,[9]. ومع ذلك، لا يزال عدد الدراسات التي تناولت البارامترات الكيميائية غير المرئية بصرياً، مثل ORP، محدوداً نسبياً، ولا سيما في البيئات الساحلية الانتقالية التي تتسم بتباين مكاني وزمني مرتفع وتعقيد بيوجيوكيميائي واضح [14] ,[13].

أما على الصعيد المحلي، لا تزال الدراسات التي توظف تقنيات الاستشعار عن بعد في البحوث البحرية السورية محدودة، وقد تناولت هذه الدراسات بشكل رئيسي مجالات مراقبة درجة حرارة سطح البحر في المياه البحرية السورية [15] والكشف عن التلوث الحراري المرتبط بتشغيل محطة الطاقة الحرارية في بانياس [16]، مع غياب واضح للدراسات التي تعالج المؤشرات الكيميائية لجودة المياه في المناطق المصبّية.

2 هدف البحث وأهميته

يهدف البحث إلى:

- تحليل العلاقة بين ORP والخصائص الطيفية للمياه الساحلية في المنطقة المصبية لنهر الكبير الشمالي، من خلال دمج القياسات الميدانية مع البيانات الطيفية لصور القمر الصناعي Sentinel-2.
- تحديد المتغيرات (القنوات والنسب الطيفية) الأكثر ارتباطاً بقيم ORP، بما يسمح بفهم أفضل للتفاعلات البيوجيوكيميائية التي تتحكم في الحالة الأكسدية الاختزالية للمياه في منطقة الانتقال من المياه النهرية إلى المياه البحرية خلال موسم الجفاف الذي تتسم بانخفاض التصريف النهري وزيادة تأثير المدخلات المحلية.
- تطوير نماذج إحصائية تجريبية لتقدير قيم ORP اعتماداً على المتغيرات الطيفية المختارة، وتقييم أدائها من خلال مقارنة عدة تقنيات نمذجة، تشمل الانحدار الخطي البسيط (Simple

Linear Regression)، وانحدار القوة (Power Regression)، والانحدار الأسي (Exponential Regression)، والانحدار الخطي متعدد المتغيرات (Polynomial Linear Regression). يتيح هذا النهج المقارن تحديد النموذج الأكثر ملاءمة من حيث الدقة الإحصائية وقابلية التفسير الفيزيائي، بما يعزز موثوقية استخدام بيانات الاستشعار عن بعد في تقدير ORP.

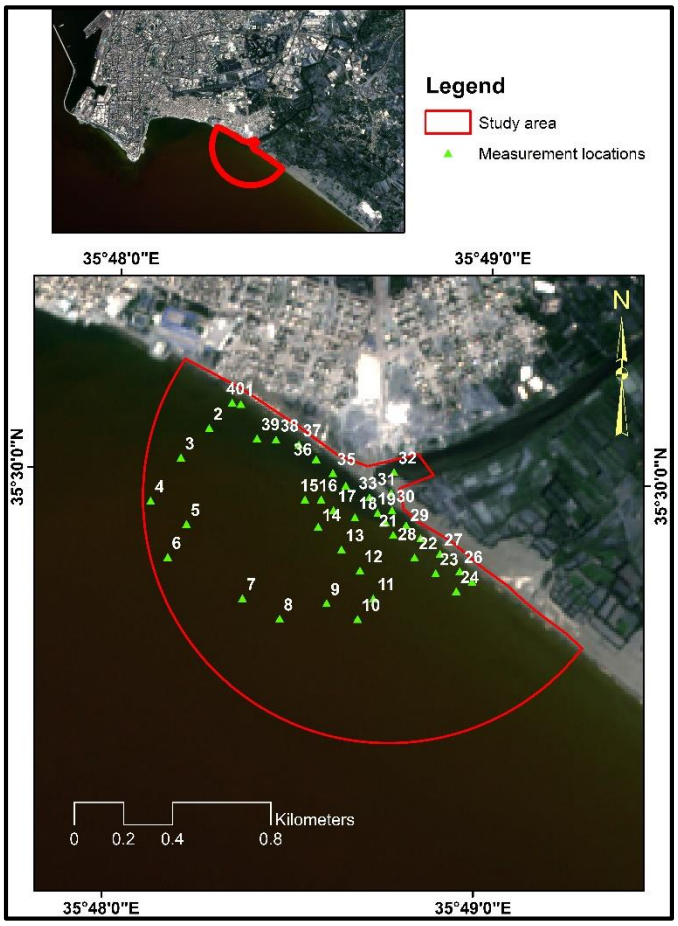
تكمن أهمية هذه الدراسة في كونها من أوائل الدراسات التي توظف تقنيات الاستشعار عن بعد والنمذجة الإحصائية التجريبية لتقدير ORP في المياه الساحلية السورية، وهي منطقة تعاني من نقص في البيانات البحرية المنتظمة. كما توفر الدراسة إطاراً منهجياً عملياً يمكن اعتماده في برامج المراقبة البيئية الساحلية، خاصة في المناطق التي يصعب فيها إجراء قياسات ميدانية مكثفة. ويسهم هذا الإطار في دعم جهود إدارة جودة المياه، وتقييم التأثيرات البيئية للتصريفات النهرية خلال مواسم الجفاف.

3 مواد وطرائق البحث

3.1 منطقة الدراسة

ينبع نهر الكبير الشمالي من جبل الأقرع والجبال الساحلية السورية، ويتجه غرباً ليصب في البحر الأبيض المتوسط جنوب مدينة اللاذقية. ويُعد هذا النهر من أغزر الأنهار الساحلية في سورية، كما يُعتبر مصبه من المناطق البيئية الساحلية ذات الأهمية الخاصة، إذ حظي باهتمام عدد من الدراسات في مجال البحوث البحرية والبيئية، نظراً لدوره في نقل المواد المغذية والملوثات من الحوض النهري إلى البيئة البحرية الساحلية [17].

يبلغ التدفق الوسطي السنوي للنهر، وفق الدراسات الهيدرولوجية المتاحة، حوالي $6.82\ m^3/s$ [18]. تم تحديد منطقة الدراسة ضمن نطاق يمتد حتى 1km من نقطة المصب باتجاه المياه المفتوحة (الشكل 1)، بما يوفّر تمثيلاً مكانياً كافياً لالتقاط التدرج في قيم ORP الناتج عن تداخل المياه النهرية والبحرية.



الشكل 1: منطقة الدراسة وتوزع محطات القياس

يتميز نهر الكبير الشمالي بتصريف مرتفع خلال موسم الأمطار، يقابله انخفاض ملحوظ في التصريف خلال موسم الجفاف، حيث تهيمن في هذه الفترة تصريفات ذات طابع زراعي وصناعي وصحي. وتُعد هذه الظروف الهيدرولوجية مناسبة لدراسة الحالة الأكسدية الاختزالية للمياه الساحلية القريبة من المصب، نظرا لانخفاض التصريف الهيدرولوجي وزيادة تأثير المدخلات المحلية على الخصائص الكيميائية للمياه.

3.2 البيانات المستخدمة

يعتمد قمر Sentinel-2 على مستشعر التصوير متعدد الأطياف (MultiSpectral Instrument, MSI) الذي يقوم بتسجيل الأشعة المنعكسة عن سطح الأرض عبر 13 نطاقاً طيفياً موزعة على أجزاء مختلفة من الطيف الكهرومغناطيسي، تمتد من النطاق الأزرق وصولاً إلى الأشعة تحت الحمراء قصيرة الموجة. تُقسَّم هذه النطاقات من حيث الدقة التمييزية المكانية إلى ثلاث فئات رئيسية تشمل نطاقات بدقة تمييزية مكانية 10m (وتضم الأزرق، الأخضر، الأحمر، وتحت الأحمر القريب)، ونطاقات بدقة تمييزية مكانية 20m (وتضم ثلاثة قنوات طيفية عند حافة النطاق الأحمر (Red Edge Bands)، بالإضافة إلى نطاقين في الأشعة تحت الحمراء القريبة الضيقة وقصيرة الموجة)، ونطاقات بدقة تمييزية مكانية 60m (وتشمل النطاق الساحلي، نطاق بخار الماء، ونطاق كشف السحب الرقيقة) [19]. يتيح هذا التوزيع المتدرّج للأطوال الموجية والدقة التمييزية المكانية تحقيق توازن بين التفاصيل المكانية العالية والتغطية الطيفية الواسعة، مما يمنح بيانات Sentinel-2 قدرة كبيرة على توصيف الخصائص الفيزيائية والبصرية لسطح الأرض والمسطحات المائية بدقة مكانية وطيفية متكاملة.

في هذا البحث، من أجل الحصول على بيانات طيفية تتوافق مع التباين المكاني المرتفع المتوقع لقيم ORP، استُخدمت النطاقات الطيفية ذات الدقة التمييزية المكانية (10m) من صور Sentinel-2، وهي: النطاق الأزرق ذو الطول الموجي المركزي (0.490µm)، والنطاق الأخضر (0.560µm)، والنطاق الأحمر (0.665µm)، ونطاق الأشعة تحت الحمراء القريبة (0.842µm)، وذلك لمنطقة الدراسة وبتاريخ يتزامن مع إجراء القياسات الميدانية. تم تحميل الصور من المستوى الثاني (Level-2A) المعالجة راديومترياً وهندسياً عبر بوابة البيانات التابعة لوكالة الفضاء الأوروبية (https://dataspace.copernicus.eu/)، تم الوصول إليه في 1 تشرين الأول 2025).

3.3 البرامج والأدوات المستخدمة

- **برنامج ArcMap**

يُعد برنامج ArcMap أحد التطبيقات المكتبية المتقدمة ضمن بيئة نظم المعلومات الجغرافية (Geographic Information Systems, GIS)، والمطوّر من قبل شركة (ESRI https://www.esri.com). يوفر هذا البرنامج مجموعة متكاملة من الأدوات المخصصة لإدارة وتحليل البيانات المكانية بمختلف أشكالها، بما في ذلك البيانات النقطية (Raster) مثل صور الأقمار الصناعية، إضافة إلى إمكانات متقدمة في التحليل المكاني وإنتاج الخرائط الكارتوغرافية. استُخدم هذه الدراسة برنامج ArcMap لمعالجة البيانات الطيفية لصور القمر الصناعي Sentinel-2، بما في ذلك استيراد القنوات الطيفية، اقتطاع الصور ضمن حدود منطقة الدراسة، وحساب النسب والمؤشرات الطيفية. كما استُخدم البرنامج لربط البيانات الفضائية بمواقع القياسات الميدانية اعتماداً على الإحداثيات الجغرافية، واستخراج القيم الطيفية المقابلة لكل محطة قياس. إضافة إلى ذلك، جرى توظيف أدوات العرض والتحليل المكاني في ArcMap لإنتاج الخرائط الغرضية التي تُمثّل التوزع المكاني لقيم ORP، مما أتاح تفسير النتائج ضمن سياقها المكاني والبيئي.

- **برنامج SPSS**

يُعد برنامج SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) من أكثر البرمجيات الإحصائية استخداماً في التحليل الكمي للبيانات في الدراسات البيئية والعلمية. يوفّر البرنامج مجموعة واسعة من الاختبارات والأساليب الإحصائية التي تتيح تحليل البيانات الوصفية والاستنتاجية بكفاءة عالية. استُخدم في هذا البحث برنامج SPSS لتنفيذ جميع التحليلات الإحصائية، بما في ذلك اختبار القيم الشاذة، وفحص الافتراضات الإحصائية للتوزيع الطبيعي، وتحليل الارتباط باستخدام معامل بيرسون، إضافة إلى تطوير النماذج الإحصائية التجريبية وتقييم أدائها. كما استُخدم البرنامج في حساب مؤشرات الخطأ الإحصائي ومعاملات النمذجة.

- **جهاز NF-C600**

يُعد جهاز NF-C600 جهازا رقمياً محمولاً مخصصاً لقياس بارامترات جودة المياه. في هذه الدراسة، تم استخدام الجهاز لقياس قيم ORP ميدانياً. تبلغ دقة الجهاز في قياس ORP نحو ±5mV، وهي دقة مناسبة لرصد التغيرات الدقيقة في الحالة الأكسدية الاختزالية للمياه في البيئات المصبية.

- **تطبيق GPSData**

لتحديد المواقع الجغرافية لمحطات القياس بدقة، تم استخدام تطبيق GPSData المثبت على الهواتف الذكية، والذي يعتمد على نظام تحديد المواقع العالمي (Global Positioning System, GPS). تم التوقف عند كل محطة قياس لفترة زمنية كافية لزيادة عدد الأقمار الصناعية المرصودة وتحسين جودة القياسات، حيث سُجلت الإحداثيات بدقة مكانية أفضل من ±5m. يضمن هذا المستوى من الدقة مطابقة مكانية دقيقة بين مواقع القياسات الميدانية والبكسلات المقابلة لها في صور Sentinel-2. ويُعد هذا التوافق المكاني عنصراً أساسياً لضمان صحة عملية الربط بين البيانات الميدانية والبيانات الطيفية المستخرجة من صور الأقمار الصناعية.

4 منهجية البحث

شملت منهجية البحث المراحل الرئيسية التالية:

4.1 إجراء القياسات الميدانية

تم التخطيط لتنفيذ رحلة بحرية ميدانية بحيث تتزامن مع مرور قمر Sentinel-2 فوق منطقة الدراسة، مع السماح بفارق زمني لا يتجاوز ساعة واحدة وذلك لضمان التوافق الزمني بين القياسات الميدانية والبيانات الفضائية من حيث الظروف البيئية السائدة. جرى تحديد محطات القياس وفق مخطط مُعدّ مسبقاً، مع مسافات بينية تراوحت بين m(250–100)، مع تكثيف المحطات في المنطقة القريبة من فم النهر بهدف تمثيل التباين المكاني الحاد المتوقع في قيم ORP ضمن منطقة تداخل المياه النهرية والبحرية.

تم تنفيذ الرحلة الميدانية بتاريخ 28 سبتمبر 2025 الساعة 11:00 صباحا بالتوقيت المحلي، في يوم خال من الغيوم، بما يضمن الحصول على بيانات طيفية عالية الجودة من Sentinel-2 دون تأثيرات كبيرة للعوامل الجوية. في كل محطة قياس، تم تسجيل قيم ORP من المياه على عمق أقل من 0.5m كما تم تحديد الإحداثيات الجغرافية لكل محطة.

في المجموع، تم إجراء القياسات في 40 محطة ميدانية موزعة على امتداد المنطقة المصبية، كما هو موضح في (الشكل 1). ويتيح هذا التوزيع المكاني التقاط التغيرات المحلية في ORP بدقة، كما يوفر قاعدة بيانات موثوقة لدعم التحليل الإحصائي وتطوير النماذج التجريبية المعتمدة على بيانات Sentinel-2.

4.2 المعالجة الطيفية لصور Sentinel-2 وربطها بالقياسات الميدانية

بعد الحصول على صور Sentinel- 2، تم استيراد جميع القنوات الطيفية إلى GIS لمعالجتها. شملت هذه العملية حساب جميع النسب الممكنة بين القنوات الطيفية (Spectral Ratios). تم بعد ذلك إدراج مواقع القياسات الميدانية باستخدام الإحداثيات الجغرافية المسجلة عبر نظام تحديد المواقع العالمي (GPS) ضمن نفس الإسقاط الكارتوغرافي لصور Sentinel- 2.

تم استخراج قيم القنوات الطيفية والنسب الطيفية عند كل محطة قياس ميدانية لضمان تمثيل دقيق لكل موقع قياس. كما تم اقتطاع المشاهد الفضائية ضمن حدود منطقة الدراسة فقط، لتحسين كفاءة المعالجة والتحليل الإحصائي اللاحق.

ولضمان أن القيم الطيفية المستخرجة تمثل المسطحات المائية حصراً في منطقة المصب، تم تطبيق مؤشر الفرق المعياري للمياه (Normalized Difference Water Index, NDWI)، المحسوب وفق المعادلة التالية [20]:

$$NDWI = \frac{p(G) - p(NIR)}{p(G) + p(NIR)} \qquad (1)$$

حيث G تمثل القناة الخضراء، وNIR القناة تحت الحمراء القريبة. وبناء على قيم المؤشر، تم استبعاد البكسلات ذات القيم الصفرية والسالبة، إذ تشير القيم الموجبة لمؤشر NDWI إلى وجود مياه سطحية، ما يضمن أن القيم الطيفية المستخدمة في التحليل اللاحق ترتبط فعلياً بالبيئة المائية للمصب، ويقلل من تأثير بكسلات اليابسة أو البكسلات المختلطة على نتائج النمذجة الإحصائية.

4.3 تطوير واختبار أداء النماذج الإحصائية التجريبية

4.3.1 اختبار القيم الشاذة والتحقق من الافتراضات الإحصائية

قبل تطوير النماذج الإحصائية التجريبية، تم تطبيق طريقة المدى الربيعي (Interquartile Range, IQR) للكشف عن القيم الشاذة المحتملة في بيانات ORP، وذلك لضمان استقرار معاملات النمذجة وتحسين موثوقية النتائج [21]. جرى تنفيذ هذه التحليل باستخدام البرنامج الإحصائي SPSS. تعتمد طريقة IQR على توصيف تشتت البيانات دون افتراض شكل توزيعي مسبق، مما يجعلها مناسبة للبيانات البيئية التي قد تتأثر بتقلبات مكانية محلية أو أخطاء قياس عرضية.

يُعرّف IQR على أنه الفرق بين الربيع الثالث Q_3 والربيع الأول Q_1:

$$IQR = Q_3 - Q_1$$

وبناء على ذلك، يتم تحديد حدود القيم المقبولة إحصائياً، أي الحد الأدنى L والحد الأعلى U ، كالآتي:

$$L = Q_1 - 1.5 \times IQR;\ U = Q_3 + 1.5 \times IQR \qquad (2)$$

تُصنَّف أي قيمة تقع خارج هذا النطاق على أنها قيمة شاذة (Outlier). في هذه الدراسة، تم استبعاد القيم الشاذة التي تم تحديدها باستخدام هذه الطريقة من التحليلات اللاحقة، لتقليل تأثيرها المحتمل على تقدير معاملات الانحدار، وزيادة دقة العلاقات الارتباطية بين المتغيرات.

بعد استبعاد القيم الشاذة المحددة، تم فحص خصائص التوزيع الإحصائي لبيانات ORP باستخدام اختبار شابيرو–ويلك (Wilk–Shapiro) لتحديد مدى ملاءمة استخدام الأساليب الإحصائية المعتمدة على افتراض التوزيع الطبيعي، وهو افتراض أساسي لتحليل الارتباط وتطوير النماذج الإحصائية التجريبية. في هذا الاختبار، تنص الفرضية الصفرية H_0 على أن البيانات تتبع توزيعاً طبيعياً، بينما تشير الفرضية البديلة H_1 إلى عدم تحقق هذا الافتراض. يعتمد القرار على قيمة الاحتمالية p عند مستوى دلالة محدد α [22].

4.3.2 تحليل الارتباط واختيار المتغيرات الطيفية الأكثر ملاءمة

بعد التأكد من التوزيع الطبيعي لقيم ORP، ولتحديد المتغيرات الطيفية الأكثر ملاءمة لتقدير هذا البارامتر اعتماداً على البيانات الطيفية للقمر الصناعي Sentinel–2، تم إجراء تحليل ارتباط بيرسون (Pearson correlation analysis) بين قيم ORP المقاسة ميدانياً والقيم الطيفية للقنوات الطيفية الفردية، إضافة إلى جميع النسب الطيفية الممكنة المحسوبة بين هذه القنوات. يهدف هذا التحليل إلى تقييم قوة واتجاه العلاقة الخطية بين المتغيرات الطيفية وقيم ORP، وتحديد أكثرها تمثيلاً للتغيرات البيوجيوكيميائية في منطقة الدراسة.

يُحسب معامل بيرسون وفق الصيغة الرياضية الآتية [23]:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \times \sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}} \qquad (3)$$

حيث، r: معامل ارتباط بيرسون؛ x_i, y_i: القيم الفردية للمتغيرين (ORP والمتغير الطيفي)، $\overline{x}, \overline{y}$: المتوسطات الحسابية لكل من للمتغيرين؛ n: عدد القياسات.

تتراوح قيم معامل الارتباط بين -1 و $+1$، حيث تشير القيم الموجبة المرتفعة إلى علاقة خطية موجبة قوية، في حين تدل القيم السالبة المرتفعة (بالقيمة المطلقة) على علاقة خطية سالبة قوية، بينما تشير القيم القريبة من الصفر إلى ضعف أو غياب العلاقة الخطية بين المتغيرين. بناء على نتائج تحليل الارتباط، تم اختيار المتغيرات الطيفية التي أظهرت أعلى قيم ارتباط معنوية مع ORP.

4.3.3 تطوير النماذج الإحصائية التجريبية

تم تطوير واختبار مجموعة من النماذج الإحصائية التجريبية اعتماداً على المتغيرات الطيفية التي أظهرت أعلى مستويات الارتباط مع ORP، وذلك بهدف تقدير قيمة هذا البارامتر من بيانات القمر الصناعي Sentinel-2. شملت عملية النمذجة اختبار المتغيرات الأكثر ارتباطا بشكل فردي، إضافة إلى دمجها في نماذج متعدد المتغيرات، وفق الأشكال الرياضية التالية [23]:

1. نموذج الانحدار الخطي البسيط. ويُعطى بالعلاقة:

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x \qquad (4)$$

حيث، β_0: الحد الثابت (Intercept)؛ β_1: معامل الانحدار (Slope)؛ x: المتغير الطيفية المستقل.

2. نموذج الانحدار الأسي، ويُعطى بالعلاقة:

$$\hat{y} = ae^{bx} \qquad (5)$$

a: ثابت المقياس (Scaling factor)؛ b: معامل التغير الأُسّي (Exponential rate coefficient)؛ e: قاعدة اللوغاريتم الطبيعي.

3. نموذج الانحدار بالقوة، ويُعطى العلاقة:

$$\hat{y} = ax^b \qquad (6)$$

a: ثابت النموذج؛ b: معامل القوة (Power coefficient)؛

4. نموذج الانحدار متعدد المتغيرات، ويُعطى بالعلاقة:

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + ... + \beta_n x_n \qquad (7)$$

β_0 : الحد الثابت؛ $\beta_i, i = 1,2,...,n$: معاملات الانحدار؛ و n : عدد المتغيرات. تم تقدير معاملات النماذج الإحصائية باستخدام طريقة المربعات الصغرى.

في هذه الدراسة، تم تحديد النموذج الأمثل للانحدار متعدد المتغيرات بالاعتماد على المتغيرات الطيفية التي أظهرت أعلى درجات الارتباط مع قيم ORP. ومن بين مجموعة نماذج الانحدار متعددة المتغيرات المختبرة، تم اختيار النموذج الذي يحقق أعلى قيمة لمعامل التحديد R^2، مع التأكد في الوقت نفسه من تحقق شرط الاستقلالية الخطية بين المتغيرات المستقلة. ولغرض الكشف عن مشكلة التعدد الخطي (Multicollinearity) وتقييم مدى استقلالية المتغيرات المستقلة، تم استخدام معامل تضخم التباين (Variance Inflation Factor, VIF)، والذي يُحسب وفق العلاقة التالية [24]:

$$VIF_i = \frac{1}{1 - R_i^2} \qquad (8)$$

حيث، VIF_i: عامل تضخم البيانات للمتغير المستقل x_i؛ R_i^2: معامل التحديد الناتج عن انحدار المتغير المستقل x_i على باقي المتغيرات المستقلة الأخرى في النموذج.

تشير القيم المرتفعة لمعامل VIF إلى وجود تعدد خطي قوي بين المتغيرات المستقلة. وبناء على هذا المعيار، تم اعتبار أي متغير طيفي يحقق $VIF \prec 5$ مناسبا للاستخدام كمدخل مستقل في النماذج الإحصائية التجريبية للانحدار الخطي متعدد المتغيرات، بما يضمن استقرار معاملات النموذج وتحسين قابليته التنبؤية والتفسيرية.

4.3.4 تقييم واختبار أداء النماذج المطورة

لتقييم قدرة النماذج الإحصائية التجريبية على تقدير قيم ORP، تم تقسيم بيانات القياس الميداني إلى مجموعة تطوير (Training Set) تمثل 75% من القياسات، ومجموعة اختبار (Testing

Set) تمثل 25% منها. استُخدمت مجموعة التطوير لتقدير معاملات النماذج، بينما استُخدمت مجموعة الاختبار لتقييم الأداء على بيانات لم تُستخدم في مرحلة التدريب.

تم حساب مؤشرات الأداء الرئيسية للنماذج باستخدام مجموعة الاختبار، وتشمل 1) معامل التحديد (Coefficient of Determination) R^2 ، 2) جذر متوسط الخطأ التربيعي (Root Mean Squared Error) $RMSE$، و3) متوسط الخطأ المطلق (Mean Absolute Error) MAE وفق المعادلات التالية:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y}_i)^2} \qquad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \qquad (10)$$

$$MAE = \sum_{i=1}^{n}\frac{|y_i - \hat{y}_i|}{n} \qquad (11)$$

y_i: القيمة الفعلية للمتغير التابع؛ $\hat{y}_i$: القيمة التنبؤية المقدرة وفق النموذج؛ $\bar{y}_i$: المتوسط الحسابي وفق القيم الفعلية؛ n: عدد القياسات في مجموعة الاختبار.

تم اختيار النموذج الأمثل على أساس تحقيق أفضل أداء تفسيري مع قيم مقبولة لأخطاء $RMSE$ و MAE. ولضمان استقرار معاملات النموذج نظراً لصغر حجم العينة نسبياً (n=40)، تم استخدام طريقة إعادة المعاينة (Bootstrap) مع 1000 تكرار لتقدير التوزيع الاحتمالي لمعاملات النماذج وتقييم استقرارها الإحصائي.

أخيرا، تم تطبيق النموذج الأمثل على صور Sentinel-2 لإنتاج خريطة التوزع المكاني لقيم ORP بهدف الفحص البصري للتوزع المكاني، وتحليل الاختلافات المحلية في المنطقة المصبية، وبالتالي تقييم موثوقية النموذج في التقاط التباين المكاني لقيم ORP.

5 النتائج والمناقشة

5.1 التدرج الأكسدي الاختزالي في المنطقة القريبة من مصب النهر

أظهرت القياسات الميدانية لقيم ORP (الجدول 1) تبايناً ملحوظاً ضمن مسافة 1km من مصب النهر. تشير القيم السالبة المرتفعة (بالقيمة المطلقة) إلى وجود ظروف مختزلة قوية في المياه القريبة من المصب. يعزى هذا إلى تراكم المواد العضوية المتحللة، نقص الأكسجين المذاب، وقلة تجديد المياه نتيجة انخفاض التصريف للنهر في هذه الفترة. هذه الظروف تسهم في تعزيز التفاعلات الكهروكيميائية الاختزالية، بما في ذلك عمليات التحلل الهوائي واللاهوائي للمواد العضوية، مما يؤدي إلى انخفاض قيم ORP.

الجدول 1: بيانات ORP المقاسة ميدانياً

№	ORP (mV)	№	ORP (mV)	№	ORP (mV)	№	ORP (mV)
1	17	**11**	15.5	**21**	2	**31**	−14
2	16	**12**	21	**22**	1	**32**	−45
3	16.5	**13**	19.5	**23**	1.5	**33**	−10
4	8	**14**	18	**24**	1.5	**34**	−7.5
5	12.5	**15**	17.5	**25**	3	**35**	−5.5
6	13	**16**	13	**26**	1	**36**	−6
7	27.5	**17**	11.5	**27**	3.5	**37**	−5
8	25	**18**	7	**28**	−1	**38**	−3
9	15	**19**	0	**29**	−1	**39**	−7.5
10	7	**20**	27.5	**30**	−13	**40**	−6.5

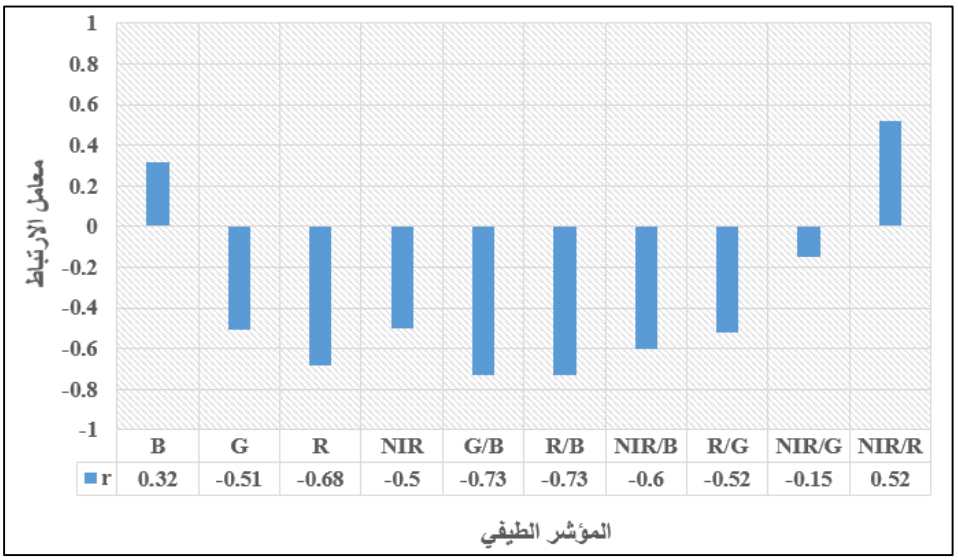
في المقابل، تم تسجيل القيم الموجبة في النقاط الأكثر اختلاطا مع المياه البحرية، ما يعكس حالة أكسدية جزئية نتيجة التهوية السطحية والتأثيرات البحرية. يشير هذا التباين إلى وجود منطقة انتقالية ديناميكية حيث تتداخل المياه النهرية المختزلة مع المياه البحرية المؤكسدة، مما ينتج عنه تدرج مكاني شديد الوضوح في حالة ORP ضمن المنطقة المصبية. وسيتم مناقشة التوزع المكاني لقيم ORP بمزيد من التفصيل في فقرة لاحقة.

5.2 تحديد المتغيرات الطيفية الأكثر ارتباطا بقيم ORP باستخدام تحليل القيم الشاذة وتحليل الارتباط

أظهر تحليل IQR أن إحدى القياسات الميدانية المسجلة في المحطة رقم 32 تُعد قيمة شاذة إحصائياً، وتم استبعادها من التحليلات الإحصائية اللاحقة لتجنب تأثيرها السلبي المحتمل على دقة تقديرات معاملات النماذج الإحصائية واستقراراها في ظل العدد المحدود نسبياً للقياسات الميدانية.

بعد استبعاد القيمة الشاذة، تم فحص الخصائص الإحصائية لتوزيع متغير ORP للتحقق من طبيعة ملاءمته للتحليلات اللاحقة. أظهرت نتائج اختبار Shapiro–Wilk عدم إمكانية رفض فرضية التوزيع الطبيعي عند مستوى دلالة $\alpha = 0.05$، حيث بلغت قيمة الاحتمالية الإحصائية $p-value = 0.26$. يشير ذلك إلى أن بيانات ORP تتبع توزيعاً طبيعياً، مما يبرر استخدام الأساليب الإحصائية البارامترية.

بعد ذلك، فُحصت العلاقة بين قيم ORP المقاسة ميدانياً والقيم في كل من القنوات الطيفية الفردية والنسب الطيفية من صور Sentinel-2 بهدف تحديد المتغيرات المستقلة الأكثر ملاءمة لتطوير نماذج تقدير موثوقة لقيم ORP. أظهرت نتائج تحليل معامل ارتباط بيرسون (الشكل 2) وجود تباين واضح في قوة واتجاه العلاقات الارتباطية بين المتغيرات الطيفية وقيم ORP ضمن منطقة الدراسة.



الشكل 2: معامل الارتباط بين الجهد الأكسدي الاختزالي والمؤشرات الطيفية

على مستوى النطاقات الطيفية الفردية، أظهر النطاق الأزرق (B) ارتباطاً موجباً ضعيفاً مع ORP (r=0.32)، في حين أظهرت النطاقات الخضراء (G) والحمراء (R) وتحت الحمراء القريبة (NIR) ارتباطات سالبة تراوحت بين متوسطة وقوية مع ORP (r=−0.51, −0.68, −0.50) على التوالي.

تعكس هذه الأنماط الارتباطية الطبيعة البيوجيوكيميائية المعقدة للبيئات المصبية، التي تتميز بارتفاع تركيز المواد العضوية الذائبة والمعلقة والكلوروفيل-أ، والتي ترتبط عادة بانخفاض قيم ORP نتيجة زيادة الاستهلاك الحيوي والكيميائي للأكسجين. وترتبط خصائص الانعكاسية الطيفية للمياه في المناطق المصبية بجميع المواد النشطة بصرياً، حيث تسهم وفرة المواد المعلقة القادمة مع المياه النهرية في زيادة الانعكاسية الطيفية في النطاقين الأحمر وتحت الأحمر القريب مقارنة بالمياه البحرية المفتوحة [25]. في المقابل، تؤدي وفرة المواد العضوية الذائبة، التي تتميز بامتصاص الأشعة في النطاق الأزرق، إلى خفض الانعكاسية الطيفية في هذا

النطاق مقارنة بالمياه البحرية [26]. كما تؤدي زيادة تراكيز الكلوروفيل-أ إلى رفع الانعكاسية الطيفية في النطاق الأخضر مقارنة بالمياه البحرية [1].

عند تحليل النسب الطيفية، لوحظ تحسن واضح في قوة العلاقات الارتباطية مع قيم ORP مقارنة باستخدام النطاقات الفردية. فقد أظهرت نسبتا G/B وR/B ارتباطاً سالباً قوياً جداً مع ORP (r=−0.73) لكل منهما، بينما أظهرت نسبة NIR/B ارتباطا سالباً قوياً نسبياً (r=−0.60). كما أظهرت نسبة NIR/R ارتباطاً موجباً متوسطاً (r=0.52)، وأظهرت نسبة R/G ارتباطاً متوسطاً سالباً (r=0.52)، في حين سجلت نسبة NIR/G ارتباطاً ضعيفاً جداً (r=−0.15)، مما يشير إلى محدودية قدرتها على تفسير التغيرات في قيم ORP.

تشير هذه النتائج إلى أنه على الرغم من أن النطاق الأزرق منفرداً يمتلك قدرة تفسيرية محدودة لقيم ORP، فإن دمجه ضمن النسب الطيفية يؤدي إلى تعزيز ملحوظ في قوة الارتباط. ويُعزى ذلك إلى أن النسب الطيفية تقلل من تأثير العوامل الخارجية المشتركة، مثل الإضاءة وهندسة الرصد، وتُبرز التباينات النسبية في الخصائص البصرية للمياه [27] ,[9]. يكتسب هذا الأمر أهمية خاصة في مناطق تداخل المياه النهرية والبحرية التي تتميز بوفرة مختلف أشكال المواد النشطة بصرياً. وبذلك، تُعد النسب الطيفية أكثر حساسية للتغيرات الفيزيائية والكيميائية للمياه المصبية، مما يجعلها متغيرات مستقلة مناسبة لتطوير نماذج تقدير ORP اعتماداً على بيانات Sentinel-2.

5.3 اختبار النماذج الإحصائية التجريبية واختيار النموذج الأمثل

استناداً إلى المتغيرات الطيفية التي أظهرت أعلى درجات الارتباط مع قيم ORP، تم تطوير مجموع من النماذج الإحصائية التجريبية لتقدير قيم ORP بالاعتماد على بيانات Sentinel-2. شملت هذه النماذج صيغ الانحدار الخطي والأسي ونموذج القوة باستخدام متغير مستقل منفرد، إضافة إلى نموذج انحدار خطي متعدد المتغيرات باستخدام متغيرين مستقلين (الجدول 2).

الجدول 2: أداء النماذج الإحصائية التجريبية المختبرة

المتغير المستقل	نموذج الانحدار	النموذج المطوّر	R^2	RMSE (mV)	MAE (mV)
R/B	الخطي	$ORP = 75.794 - 83.354 \times \rho(R/B)$	0.53	7.0	6.3
	الأسي	$ORP = 1000 - 208.15 \times e^{-0.813 \times \rho(R/B)}$	0.54	6.3	5.8
	القوة	$ORP = 1000 - 92.35 \times \rho(R/B)^{-0.718}$	0.55	5.8	5.3
G/B	الخطي	$ORP = 126.198 - 113.944 \times \rho(G/B)$	0.53	5.1	4.3
	الأسي	$ORP = 1000 - 332.637 \times e^{-1.089 \times \rho(G/B)}$	0.52	5.0	4.0
	القوة	$ORP = 1000 - 111.621 \times \rho(G/B)^{-1.122}$	0.52	5.1	4.0
NIR/B	الخطي	$ORP = 69.044 - 81.618 \times \rho(NIR/B)$	0.36	12.8	9.9
	الأسي	$ORP = 1000 - 169.790 \times e^{-0.808 \times \rho(NIR/B)}$	0.38	10.6	8.9
	القوة	$ORP = 1000 - 87.310 \times (NIR/B)^{-0.714}$	0.39	9.5	8.3
G/B, NIR/B	متعدد المتغيرات	$ORP = 126.48 - 90.70 \times \rho(G/B) - -32.15 \times \rho(NIR/B)$	0.57	6.7	6.0

أظهرت نتائج تقييم أداء النماذج الإحصائية أن المؤشرات الطيفية المشتقة من صور Sentinel-2 تمتلك قدرة تفسيرية جيدة لتقدير ORP، مع وجود تباين واضح في مستوى الأداء تبعا لنوع المؤشر الطيفي والصيغة الإحصائية المعتمدة. فقد حققت النماذج الأحادية المعتمدة على نسبة R/B أفضل ضمن هذه الفئة، حيث تراوحت قيم معامل التحديد بين 0.53 و0.55، مع تسجيل أدق النتائج عند استخدام نموذج القوة، والذي ترافق مع قيم أخطاء (RMSE=5.8–7.0)mV و(MAE=5.3–6.3)mV على التوالي. تشير هذه النتائج إلى وجود علاقة غير خطية بين هذه النسبة الطيفية R/B وقيم ORP، ما يعكس حساسية جيدة لهذه النسبة عند استخدامها بمفردها كمؤشر طيفي للتغيرات المشتركة في المواد العالقة والمواد العضوية الذائبة التي تؤثر في الحالة الأكسدية الاختزالية للمياه المصبية.

في المقابل، أظهرت النماذج الأحادية المعتمدة على G/B أداء أكثر استقرار من حيث مؤشرات الأخطاء (RMSE=5.0–5.1)mV و(MAE=4.0–4.3)mV على التوالي، إلا أن

قدرتها التفسيرية بقيت محدودة، حيث لم تتجاوز قيم معامل التحديد نطاق 0.53–0.52. يشير ذلك إلى أن هذا المؤشر، على الرغم من استقراره الإحصائي، غير كاف بمفرده لتمثيل التعقيد البيوكيميائي الذي يتحكم في تباين قيم ORP. أما المؤشر NIR/B فقد أظهر أضعف أداء من حيث القدرة التفسيرية ودقة التقدير، ما يعكس محدودية قدرته على تمثيله للعمليات الكيميائية والبيولوجية المؤثرة على ORP.

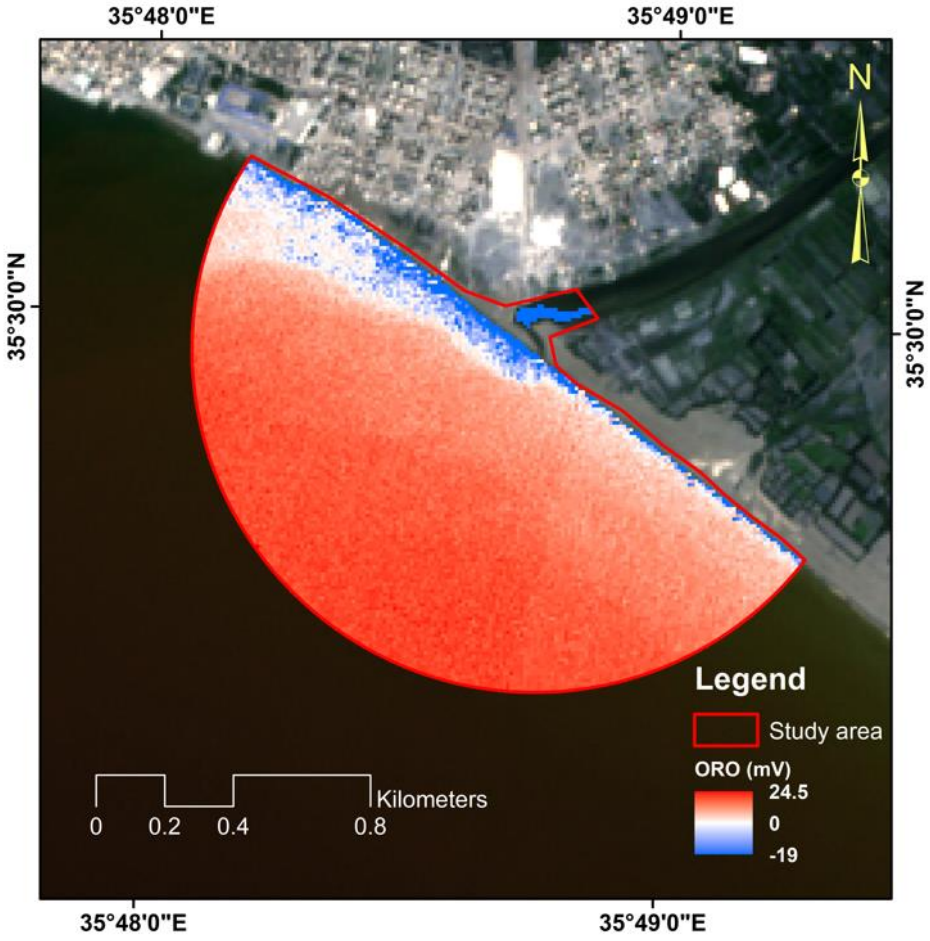
من بين جميع النماذج المختبرة، برز النموذج الخطي متعدد المتغيرات المعتمد على نسبتي G/B و NIR/B بوصفه النموذج الأمثل من حيث القدرة التفسيرية الكلية، إذ حقق أعلى قيمة لمعامل التحديد بلغت 0.57، مع قيم أخطاء مقبولة (RMSE=6.7mV و MAE=6.0mV). تشير هذه النتيجة إلى أن النموذج المطوّر قادر على تفسير نحو 57% من التباين الكلي في قيم ORP، وهو تحسن ملحوظ مقارنة بالنماذج الأحادية. ويُحتمل أن يعود هذا التحسن إلى أن دمج مؤشرات طيفية تعكس العمليات الحيوية، مثل الإنتاجية الأولية المرتبطة بالكلوروفيل، مع مؤشرات أخرى تمثل الخصائص الفيزيائية للمياه مثل العكارة والمواد العالقة، يتيح توصيفاً أكثر واقعية للتوازن بين العمليات المؤكسدة والمختزلة التي تتحكم في قيم ORP داخل المنطقة المصبية.

تتوافق هذه النتائج مع ما أشارت إليه دراسات سابقة أكدت أن ORP لا يرتبط بخاصية بصرية واحدة، بل يتأثر بتفاعل معقّد بين المادة العضوية الذائبة، والمواد العالقة، والنشاط الحيوي [9]. كما أظهرت دراسة [28] إمكانية تطوير نموذج إحصائي تجريبي لتقدير ORP في خزان كهرومائي باستخدام صور Sentinel–2 وبيانات 13 محطة قياس، حيث حقق النموذج معامل تحديد بلغ 0.65، وهي قيمة قريبة من النتائج المتحصل عليها في هذه الدراسة، مما يعزز موثوقية النهج المتبع ويؤكد قابلية تطبيقه في البيئات المائية الانتقالية.

5.4 تقييم التوزع المكاني لقيم ORP

تم تطبيق النموذج الإحصائي الأمثل، الذي تم اختياره بناء على مؤشرات الأداء الإحصائية، على صور Sentinel–2 لإنتاج خريطة التوزع المكاني لقيم ORP ضمن منطقة الدراسة (الشكل 3). يُظهر الفحص البصري للخريطة وجود تدرج مكاني واضح في قيم ORP داخل

المنطقة المصبية لنهر الكبير الشمالي، حيث تراوحت القيم بين 19mV− و24.5mV. سُجّلت القيم السالبة والمنخفضة بشكل رئيسي في المياه النهرية القريبة من فم المصب، في حين ظهرت قيم قريبة من الصفر في المناطق الساحلية المجاورة تلاها ارتفاع تدريجي في قيم ORP باتجاه المياه البحرية المفتوحة.



الشكل 3: التوزع المكاني لقيم ORP في المنطقة المصبية لنهر الكبير الشمالي

كما يُبيّن التوزع المكاني اتجاهاً عاماً لارتفاع قيم ORP نحو الشمال، وهو نمط يتوافق مع اتجاه التيارات البحرية السائدة على طول الساحل السوري للبحر الأبيض المتوسط، والتي تسهم في تعزيز عمليات الخلط والتهوية وزيادة التأثير البحري المؤكسد على الكتلة المائية المصبية [29], [30]. ويعكس هذا التدرج المكاني الانتقال التدريجي من بيئة نهرية ذات ظروف مختزلة نسبياً إلى بيئة بحرية أكثر أكسدة، وهو نمط شائع في الأنظمة المصبية ذات التصريف النهري المنخفض خلال موسم الجفاف.

بشكل عام، لوحظ ازدياد واضح قيم ORP مع الابتعاد عن المياه النهرية باتجاه المياه البحرية المفتوحة، وهو ما يتوافق مع السلوك المعروف لمؤشر ORP في المناطق المصبية، حيث ترتبط القيمة المنخفضة عند مصبات الأنهار بعمليات كيميائية وبيئية مهمة، إذ تسهم الظروف المختزِلة في تعزيز تحرّر الفوسفور المرتبط بالرواسب وانتقاله إلى الوسط المائي عند مناطق المصب، مما يزيد من توافره الحيوي [2].

تتوافق نتائج هذه الدراسة أيضا مع ما توصلت إليه دراسة [31] التي أظهرت وجود تدرّج واضح في انخفاض تراكيز الفوسفور بالانتقال من المياه النهرية إلى المياه البحرية عند مصب نهر الكبير الشمالي. كما يتوافق نمط التوزع المكاني لقيم ORP مع نتائج [32]، التي رصدت أعلى تراكيز للشوارد المغذية، بما في ذلك النترات والنتريت والأمونيوم والفوسفات والسيليكات، عند نقطة مصب نهر الكبير الشمالي، مع تناقصها التدريجي باتجاه المياه البحرية.

ويُعدّ هذا التدرج الكيميائي عاملاً مؤثراً في توزّع العوالق النباتية، التي تمثل القاعدة الأساسية للشبكة الغذائية المائية في المياه البحرية. كما أن سيادة الظروف المختزلة نسبياً، والمتمثلة بقيم ORP السالبة أو القريبة من الصفر عند مصب نهر الكبير الشمالي، قد تسهم في تعزيز عمليات الإثراء الغذائي (Eutrophication)، خاصة خلال فترة الجفاف، وهو ما يتوافق مع نتائج دراسة [33] التي تناولت ديناميكية المغذيات المؤثرة في نمو العوالق النباتية في منطقة المصبية نفسها. وتؤكد هذه النتائج أهمية استخدام خرائط ORP المشتقة من بيانات الاستشعار عن بعد كأداة داعمة لفهم العمليات البيوجيوكيميائية والتفاعلات البيئية في المناطق المصبية الساحلية.

6 الاستنتاجات والتوصيات

أظهرت نتائج هذه الدراسة إمكانية توظيف بيانات القمر الصناعي Sentinel-2، بالاشتراك مع النمذجة الإحصائية التجريبية، لتقدير التوزع المكاني لقيم ORP في البيئات المصبية الساحلية ذات الديناميكية العالية. أظهر تحليل الارتباط أن بعض النسب الطيفية المشتقة من نطاقات Sentinel-2، ولا سيما G/B و R/B، تمتلك قدرة تفسيرية جيدة لتغيرات ORP مقارنة بالقنوات الطيفية الفردية، إذ تراوحت قيم معامل التحديد بين 0.52 و0.55، مما يؤكد حساسية النسب الطيفية للتغيرات الفيزيائية والبيوجيوكيميائية للمياه المصبية. كما بيّنت نتائج النمذجة الإحصائية أن النموذج الخطي متعدد المتغيرات القائم على دمج النسب الطيفية G/B و NIR/B هو الأكثر كفاءة في تمثيل التباين المكاني لقيم ORP، حيث بلغت قيمة معامل التحديد 0.57، متفوقا على النماذج الأحادية من حيث القدرة التفسيرية.

كما أظهر تقييم التوزع المكاني لقيم ORP وجود تدرج واضح ضمن المنطقة المصبية لنهر الكبير الشمالي، يعكس الانتقال التدريجي من ظروف مختزلة في المياه النهرية إلى ظروف أكثر أكسدة باتجاه المياه البحرية المفتوحة خلال موسم الجفاف. وتوصي الدراسة بتوظيف هذا النهج المتكامل بين تقنيات الاستشعار عن بعد والإحصاء البيئي في برامج المراقبة البيئية الساحلية طويلة الأمد، ولا سيما في المناطق التي تعاني من محدودية القياسات الميدانية المنتظمة. كما يُوصى بتوسيع نطاق الدراسات المستقبلية لتشمل مواسم هيدرولوجية مختلفة ومناطق مصبية أخرى، ودمج بارامترات إضافية لجودة المياه، وزيادة عدد محطات القياس، واختبار نماذج انحدار متقدمة قائمة على تقنيات التعلم الآلي، بما يعزز دقة تقدير ORP ويسهم في فهم أعمق للعمليات البيوجيوكيميائية في مصبات الأنهار الساحلية.

المراجع

[1] S. D. V Giakoumatos, N. T. Skoulikidis, S. Karavoltsos, A. Sakellari, and E. Dimitriou, "Spatiotemporal Variations in Water Physicochemical Status in Pinios River Catchment, at Eastern

Mediterranean Region," *Land*, vol. 13, no. 11, p. 1959, Nov. 2024, doi: 10.3390/land13111959.

[2] Z. Li, Y. Sheng, J. Yang, and E. D. Burton, "Phosphorus Release from Coastal Sediments: Impacts of the Oxidation-Reduction Potential and Sulfide," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 113, no. 1–2, pp. 176–181, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.marpolbul.2016.09.007.

[3] A. Karbassi and A. Marefat, "The Impact of Increased Oxygen Conditions on Heavy Metal Flocculation in the Sefidrud Estuary," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 121, no. 1–2, pp. 168–175, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.marpolbul.2017.06.011.

[4] A. Marefat, S. Asgari, R. Badpa, M. Jahanirad, M. Sagheb Molaei, and A. Karbassi, "Geospatial Investigation on Self-Purification Capacity of River Estuaries in the Caspian Region: Reducing Heavy Metals Pollution," *npj Clean Water*, vol. 7, no. 1, p. 32, Apr. 2024, doi: 10.1038/s41545-024-00327-4.

[5] W.-C. Lin, K. Brondum, C. Monroe, and M. Burns, "Multifunctional Water Sensors for pH, ORP, and Conductivity Using Only Microfabricated Platinum Electrodes," *Sensors*, vol. 17, no. 7, p. 1655, Jul. 2017, doi: 10.3390/s17071655.

[6] J. Lee *et al.*, "Fabrication of Microelectrode Arrays for In Situ Sensing of Oxidation Reduction Potentials," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 115, no. 1, pp. 220–226, May 2006, doi: 10.1016/j.snb.2005.09.003.

[7] S. Ngamile, S. Madonsela, and M. Kganyago, "Trends in Remote Sensing of Water Quality Parameters in Inland Water Bodies: A Systematic Review," *Front. Environ. Sci.*, vol. 13, pp. 1–22, Mar. 2025, doi: 10.3389/fenvs.2025.1549301.

[8] M. He, Q. Qian, X. Liu, J. Zhang, and J. Curry, "Recent Progress on Surface Water Quality Models Utilizing Machine Learning Techniques," *Water*, vol. 16, no. 24, p. 3616, Dec. 2024, doi: 10.3390/w16243616.

[9] Z. Wu *et al.*, "A Review of Remote Sensing-Based Water Quality Monitoring in Turbid Coastal Waters," *Intell. Mar. Technol. Syst.*, vol. 3, no. 1, p. 24, Aug. 2025, doi: 10.1007/s44295-025-00075-2.

[10] F. Chaaban, "Evaluation of Object-Based Classification Performance for Built-Up Areas in Sentinel-2B Satellite Imagery Compared to Pixel-Based Classification," *Al-Baath Univ. J.*, vol. 47, no. 7 (Published in Arabic), pp. 41–64, 2025.

[11] H. Darwishe, A. Mohammad, and F. Chaaban, "Developing a Model of Deep Learning by ANNs for Urban Areas Extraction from Remote Sensing Images- Study Area: Homs-Tartous," *Al-Baath Univ. J.*, vol. 43, no. 7 (Published in Arabic), pp. 11–42, 2021.

[12] A. Khatib and A. P. Sizov, "Mapping the Spatial Distribution and Potential Expansion of Agricultural Plastic Greenhouses in Tartus, Syria Using GIS and Remote Sensing Techniques," *Geocarto Int.*, vol. 38, no. 1, pp. 1–24, Dec. 2023, doi: 10.1080/10106049.2022.2134465.

[13] H. Chen, X. Gao, and R. Yuan, "Trends in Remote Sensing of Water Quality Parameters in Inland Water Bodies: A Systematic Review," *Water*, vol. 17, no. 20, p. 3000, Oct. 2025, doi: 10.3390/w17203000.

[14] M. R. Nikoo, M. G. Zamani, M. M. Zadeh, G. Al-Rawas, M. Al-Wardy, and A. H. Gandomi, "Mapping Reservoir Water Quality from Sentinel-2 Satellite Data Based on a New Approach of Weighted Averaging: Application of Bayesian Maximum Entropy," *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, p. 16438, Jul. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-66699-2.

[15] A. Khatib and F. Chaaban, "Spatio-temporal Monitoring of Sea Surface Temperature in the Syrian Territorial Waters (Eastern Mediterranean) using Landsat Time Series and Google Earth Engine Platform," *Adv. Sp. Res.*, vol. 76, no. 11, pp. 6741–6760, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.asr.2025.09.034.

[16] A. Khatib, B. Al-Araj, and Z. Salhab, "Long-Term Monitoring of Thermal Pollution from Baniyas Power Plant in the Syrian Coastal Water using Landsat Data," *Remote Sens. Appl. Soc. Environ.*, vol. 36, p. 101287, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.rsase.2024.101287.

[17] A. Ibrahim, H. Saleh, S. Ghadeer, M. Hussein, E. Arabic, and M. Joony, *A Geobio-Morphological Survey of Specific Areas of the Syrian Continental Shelf and Determining the Nature of the Bottom*. Higher Commission for Scientific Research (Syria), 2015.

[18] G. Ammar, A. Alasaad, A. Abdalrahman, and S. Hayek, "Impact of Climate Changes on the Discharges Of AL-KABEER AL-SHEMALE River," *Tishreen Univ. J. Res. Sci. Stud. - Eng. Sci. Ser.*, vol. 35, no. 3 (Published in Arabic), pp. 9–22, 2013.

[19] ESA, "SENTINEL-2 User Handbook (Technical Guide)," European Space Agency, 2015. [Online]. Available: https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/Sentinel-

2_User_Handbook.

[20] B. Gao, "NDWI—A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space," *Remote Sens. Environ.*, vol. 58, no. 3, pp. 257–266, Dec. 1996, doi: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.

[21] J. W. Tukey, *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley, 1977.

[22] S. S. Shapiro and M. B. Wilk., "An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples)," *Biometrika*, vol. 52, no. 3, pp. 591–611, 1965.

[23] D. C. Montgomery, E. A. Peck, and G. G. Vining, *Introduction to Linear Regression Analysis*, 5th ed. John Wiley & Sons, 2012.

[24] J. Ferre, "Regression Diagnostics," in *Comprehensive Chemometrics*, 2009, pp. 33–89.

[25] L. Santos, A. Pinto, O. Filipe, Â. Cunha, E. B. H. Santos, and A. Almeida, "Insights on the Optical Properties of Estuarine DOM – Hydrological and Biological Influences," *PLoS One*, vol. 11, no. 5, p. e0154519, May 2016, doi: 10.1371/journal.pone.0154519.

[26] A. Bricaud, A. Morel, and L. Prieur, "Absorption by Dissolved Organic Matter of the Sea (Yellow Substance) in the UV and Visible Domains," *Limnol. Oceanogr.*, vol. 26, no. 1, pp. 43–53, Jan. 1981, doi: 10.4319/lo.1981.26.1.0043.

[27] C. Song, C. E. Woodcock, K. C. Seto, M. P. Lenney, and S. A. Macomber, "Classification and Change Detection Using Landsat TM Data: When and How to Correct Atmospheric Effects?," *Remote Sens. Environ.*, vol. 75, no. 2, pp. 230–244, Feb. 2001, doi: 10.1016/S0034-4257(00)00169-3.

[28] F. M. C. Pizani, P. Maillard, A. F. F. Ferreira, and C. C. de Amorim, "Estimation of Water Quality in a Reservoir from Sentinel-2 MSI and Landsat-8 OLI Sensors," *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, vol. V-3–2020, pp. 401–408, Aug. 2020, doi: 10.5194/isprs-annals-V-3-2020-401-2020.

[29] M. Menna *et al.*, "On the Circulation and Thermohaline Properties of the Eastern Mediterranean Sea," *Front. Mar. Sci.*, vol. 8, pp. 1–19, 2021, doi: 10.3389/fmars.2021.671469.

[30] G. Baaklini *et al.*, "Surface Circulation Properties in the Eastern Mediterranean Emphasized Using Machine Learning Methods," *Ocean Sci.*, vol. 18, no. 5, pp. 1491–1505, Oct. 2022, doi: 10.5194/os-18-1491-

2022.

[31] H. E. Laika, H. Krawi, and R. Al-Hayek, "Determining Organic and Inorganic Phosphorus Concentration in Sediment Columns, in Al-Kabir Al-Shimali and Al-Hussain Estuaries," *Tishreen Univ. J. Res. Sci. Stud. - Basic Sci. Ser.*, vol. 37, no. 4 (Published in Arabic), pp. 115–130, 2015.

[32] H. Krawi, F. Darwich, H. E. Laika, and S. Joulak, "Dissolved Nutrients Behavior Along The Salinity Gradient At The AL-Kabir Alshemali River Mouth (Mediterranean - Syria)," *Tishreen Univ. J. Res. Sci. Stud. - Basic Sci. Ser.*, vol. 40, no. 5 (Published in Arabic), pp. 85–103, 2018.

[33] F. Darwich and L. Sabbagh, "A Study of Biodiversity Spatial and Nutrient Changes of Phytoplankton in Al-Kabir Al-Shamali River Lattakia – Syria)," *Latakia Univ. J. Res. Sci. Stud. - Biol. Sci. Ser.*, vol. 47, no. 3 (Published in Arabic), pp. 103–119, 2025.