

تكامل بيانات الاستشعار عن بُعد متعددة الأطياف مع المسح الجيولوجي والتحليل الجيوكيميائي لتحديد مناطق التمدن الواعدة في مديرية لودر – محافظة أبين، اليمن

بشار سيف عبدالواحد الطيب

باحث في قسم الجغرافيا ونظم المعلومات الجغرافية، كلية الآداب، جامعة عدن، عضو منتسب في هيئة
المساحة الجيولوجية والثروات المعدنية اليمنية، عدن، الجمهورية اليمنية
bashar.altayeb@gsmr-aden.org

ملخص البحث

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم الإمكانات المعدنية في منطقة أمسلامية بمديرية لودر، محافظة أبين – اليمن، باستخدام تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية (GIS)، ودمجها مع التحليل الجيوكيميائي والمسح الجيولوجي، بهدف تحديد مناطق التمدن ذات الأولوية. اعتمدت المنهجية على تحليل مرئيات Landsat 8 وASTER باستخدام النسب والمؤشرات الطيفية المرتبطة بالتحويرات الهيدروحرارية والمعادن الطينية والكاربوناتية، إلى جانب تنفيذ مسح ميداني وجمع عينات صخرية خضعت للتحليل الكيميائي بتقنية XRF. تم إدماج النتائج الطيفية والجيوكيميائية ضمن بيئة GIS لإنتاج خرائط احتمالية التمدن.

أظهرت النتائج كفاءة مرئيات ASTER في تتبع مؤشرات التحوير الهيدروحراري، بينما كشفت التحاليل الجيوكيميائية عن تراكيز مرتفعة لعناصر استراتيحية، أبرزها الحديد والنيوبيوم، إضافة إلى وجود المغنيتيت ضمن صخور البيغماتيت. كما أظهرت المناطق الجبلية شمال منطقة الدراسة توافقاً واضحاً بين المؤشرات الطيفية والبيانات البنيوية، خاصة كثافة الخطوط التركيبية، مما يشير إلى دور التحكم البنيوي في توزيع التمدنات.

تؤكد الدراسة أن التكامل بين التحليل الطيفي والجيوكيميائي والبيانات البنيوية يمثل أسلوباً فعالاً ومنخفض التكلفة لاستهداف مناطق التمدن في البيئات الجبلية المعقدة. وتبرز منطقة أمسلامية كهدف واعد للاستكشاف المعدني المستقبلي، مع التوصية بتطبيق تقنيات طيفية عالية الدقة وتنفيذ أعمال حفر استكشافية للتحقق من النتائج.

الكلمات المفتاحية: الاستشعار عن بعد، نظم المعلومات الجغرافية، التمدن، التحليل الجيوكيميائي، المسح الجيولوجي، ASTER، Landsat 8.

Integration of Multispectral Remote Sensing Data with Geological Survey and Geochemical Analysis to Identify Promising Mineralization Zones in Lodar District – Abyan Governorate, Yemen

Bashar Saif Abdulwahid Al-Tayeb

Researcher, Department of Geography & GIS, Faculty of Arts, University of Aden, Affiliated Member, Geological Survey and Mineral Resources Board of Yemen, Aden, Republic of Yemen
basharatep@gmail.com

Abstract

This study evaluates the mineral potential of the Umsalamiyah area in Lawdar District, Abyan Governorate, Yemen, using remote sensing and Geographic Information Systems (GIS) integrated with geochemical analysis and geological field surveys. Landsat 8 and ASTER imagery were analyzed using spectral ratios and indices associated with hydrothermal alterations, clay minerals, and carbonates. Fieldwork included representative rock sampling, followed by X-ray Fluorescence (XRF) analysis. The spectral and geochemical results were integrated within a GIS environment to generate mineral prospectivity maps.

Results indicate the superior performance of ASTER imagery in detecting hydrothermal alteration indicators. Geochemical analyses revealed elevated concentrations of strategic elements, particularly iron and niobium, along with magnetite occurrences within pegmatite rocks. The mountainous regions north of the study area showed strong agreement between spectral indicators and structural features, including dense lineaments, suggesting structural control on mineralization.

The study confirms that integrating spectral, geochemical, and structural data provides an effective and cost-efficient exploration approach. The Umsalamiyah area is identified as a promising target for future mineral exploration, with recommendations for high-resolution hyperspectral sensing and detailed exploratory drilling.

Keywords: Remote Sensing, GIS, Mineralization, Geochemical Analysis, Geological Survey, ASTER, Landsat 8.

المقدمة

يمثل الاستشعار عن بعد أداة رئيسية في الاستكشاف الجيولوجي الحديث، لما يوفره من قدرة فعالة على تحليل سطح الأرض ورصد السمات المعدنية والبنوية باستخدام بيانات الأقمار الصناعية متعددة الأطياف. ومع التطور التكنولوجي وإتاحة مجموعات بيانات مجانية مثل Landsat-8 وASTER، توسعت تطبيقات هذه التقنيات في مجال الاستكشاف المعدني منخفض الكلفة.

ترتبط التمعينات الاستراتيجية غالبًا بمناطق التحويلات الهيدروحرارية والأنماط البنيوية، بما في ذلك الفوالق وحدود التماس الصخري. وتبرز أهمية هذه المعادن في ظل التزايد المستمر في الطلب العالمي عليها، نظرًا لدورها الحيوي في التطبيقات الصناعية والطاقة البديلة.

تعد الصخور الكربونيتية والبجماتيتية بيئات جيولوجية واعدة لاحتضان المعادن الاستراتيجية، حيث تتميز بخصائص معدنية وتحويلات هيدروحرارية يمكن رصدها طيفيًا. وقد أثبتت الدراسات السابقة كفاءة بيانات VNIR وSWIR في الكشف عن الأكاسيد والمعادن الطينية والكربونات المرتبطة بهذه البيئات.

بناءً عليه، تهدف هذه الدراسة إلى توظيف بيانات Landsat-8 وASTER لاستكشاف التمعينات الاستراتيجية في منطقة الدراسة، من خلال تحليل الاستجابات الطيفية للمعادن الدالة وتفسير دلالاتها الجيولوجية.

مشكلة البحث

تهدف هذه الدراسة إلى الإجابة على التساؤلات التالية:

- ما هو الاتجاه المكاني لتوزيع المعادن الاقتصادية والطينية في منطقة الدراسة؟
- إلى أي مدى تساهم تقنيات التحليل الطيفي (Band Ratio وFCC) في تحديد التراكيز المعدنية ودلالات التعدن؟
- ما العلاقة بين التوقع الطيفية للمعادن (خصوصًا الأكاسيد والكربونات) والمسح الجيولوجي والتحليل الجيوكيميائي؟
- ما مدى فعالية دمج بيانات الأقمار الصناعية في GIS لإنتاج خرائط معدنية دقيقة تخدم أغراض التنمية والاستثمار؟

أهداف البحث

يهدف البحث إلى استخدام تقنيات الاستشعار عن بعد وتطبيقات نظم المعلومات الجغرافية لأجل تحقيق:

1. رسم خرائط الرواسب المعدنية والوحدات الصخرية باستخدام تقنيات تحليل النطاقات

- (Band Ratio) والتركيب اللوني الكاذب (False Color Composite – FCC): لبيانات الأقمار الصناعية Landsat-8 وASTER.
2. إنشاء خرائط الاحتمالية المعدنية من خلال إبراز الطبقات الجيولوجية التي يُحتمل ارتباطها بالتمعدن، وتحديد المناطق ذات الاحتمالية العالية للاستكشاف المعدني (High Potential Zones).
3. التحقق من دقة النتائج المستخلصة من تحليل بيانات الاستشعار عن بعد من خلال المسح الجيولوجي والتحليل الجيوكيميائي.

مبررات البحث

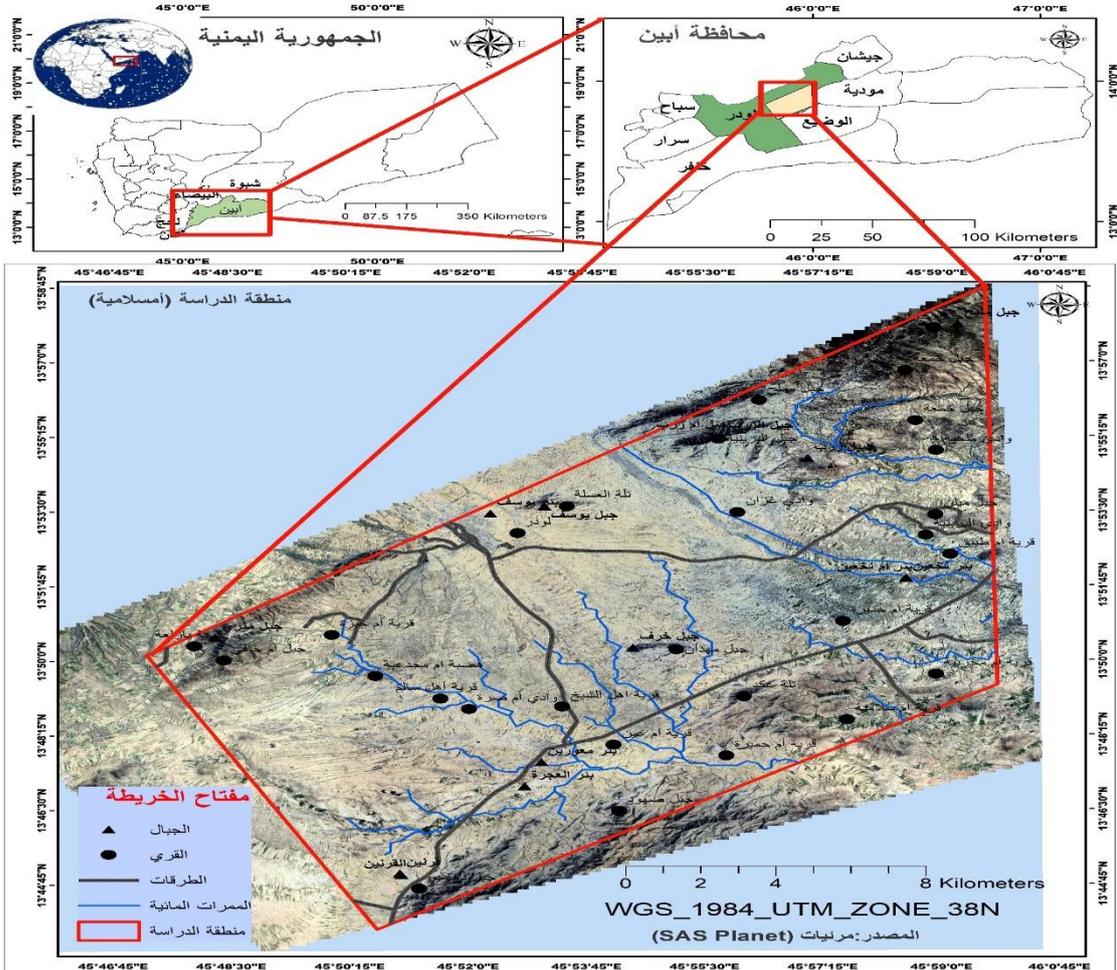
1. مواكبة التطور العلمي والتقني.
2. تقليل الكلفة والجهد في عمليات التنقيب.
3. تطوير المنهجية مقارنة بالدراسات السابقة.

فرضيات البحث

- بُني هذا البحث على عدد من الفرضيات العلمية التي سيتم التحقق من صحتها باستخدام تقنيات التحليل الطيفي والمسح الميداني والتحليل المكاني، وهي:
- تُظهر النسب الطيفية (Band Ratios) والمؤشرات الطيفية المشتقة من مرئيات Landsat 8 وASTER قدرة عالية على التمييز بين الوحدات الصخرية والرواسب المعدنية.
 - ترتبط التراكيز الطيفية المرتفعة لبعض المعادن الاقتصادية (مثل أكاسيد الحديد، كربونات الكالسيوم، الطينيات) بوحدات جيولوجية محددة يمكن تتبعها مكانياً.
 - يوجد تباين مكاني واضح في توزيع المعادن الطينية والمعادن الاستراتيجية في منطقة الدراسة، ويمكن ربط هذا التباين بالبيئة التكتونية والجيومورفولوجية للموقع.
 - يساهم الدمج بين تقنيات نظم المعلومات الجغرافية وتحليل بيانات الاستشعار عن بعد في بناء قاعدة بيانات مكانية دقيقة، تعزز من فرص الاستثمار المعدني المستدام في المنطقة.

حدود ومساحة منطقة الدراسة

تقع منطقة الدراسة في محافظة أبين ضمن النطاق الجغرافي لمديرية لودر وتُعرف محلياً باسم "أمسلامية"، وتمتد بين دائرتي عرض 13°50'00 و 13°58'00 شمالاً، وخطي طول 45°47'30 و 45°59'30 شرقاً، وتبلغ مساحتها 325.4 كم²، ويحدها من الشمال محافظة البيضاء والجنوب مديرية خنفر والغرب مديريات سباح وسرار والشرق مديريات جيشان ومودية والوضيع، انظر الخريطة رقم (1) تبين موقع منطقة الدراسة وحدودها الإدارية.



الخريطة رقم (1): الموقعية لمنطقة الدراسة (أسلامية) في مديرية لودر محافظة أبين

منهجية البحث الحالي

اعتمد هذا البحث على منهجية علمية متكاملة تستند إلى تحليل متعدد المصادر والبيانات، بهدف تحديد وتقييم المواقع المحتملة لتركيز الموارد المعدنية في مديرية لودر بمحافظة أبين -اليمن. وقد تم تنفيذ خطوات هذه المنهجية وفق التسلسل الموضح في الشكل الانسيابي (الشكل 1)، وتشمل ما يلي:

أولاً: إعداد الخريطة الجيولوجية الأساس:

بدأت الدراسة بإعادة إنتاج خريطة جيولوجية تفصيلية لمنطقة الدراسة، بالاعتماد على الخرائط السابقة، والصور الفضائية، والتحقق الحقلية. وقد جرى ترسيم الوحدات الصخرية وتحديد التكوينات ذات العلاقة بالنشاط المعدني، بما يساعد في توجيه عمليات التحليل الطيفي والميداني لاحقاً.

ثانياً: معالجة وتحليل بيانات الاستشعار عن بعد:

تم استخدام مرئيات Landsat 8 وASTER نظراً لقدرتها على تمييز التحورات الطيفية المرتبطة بالمعادن. وقد خضعت هذه الصور لمعالجات مسبقة باستخدام برنامج ENVI 5.6، شملت التصحيح الإشعاعي، تصحيح الغلاف الجوي، وتحسين التباين الطيفي. بعد ذلك، طبقت مؤشرات طيفية (مثل مؤشر الطين، والحديد، والكريونات) لاستخراج خرائط التحول المعدني (Alteration Maps) التي تُظهر المواقع المحتملة للنشاط الهيدروحراري.

ثالثاً: تحليل البنية الجيولوجية:

تم تحليل التراكيب الخطية لمنطقة الدراسة بالاعتماد على صور الأقمار الصناعية ونموذج الارتفاع الرقمي (SRTM)، حيث أُنتجت خرائط للاتجاهات التركيبية (Rose Diagram)، كثافة وتكرار الخطوط، وتقاطعاتها. وقد استُخدمت خريطة الكثافة التركيبية كمؤشر رئيسي لتحديد مناطق النشاط التكتوني العالي التي تُعد بيئات مناسبة لتراكم الخامات المعدنية.

رابعاً: الدراسات الميدانية والتحليل الجيوكيميائي:

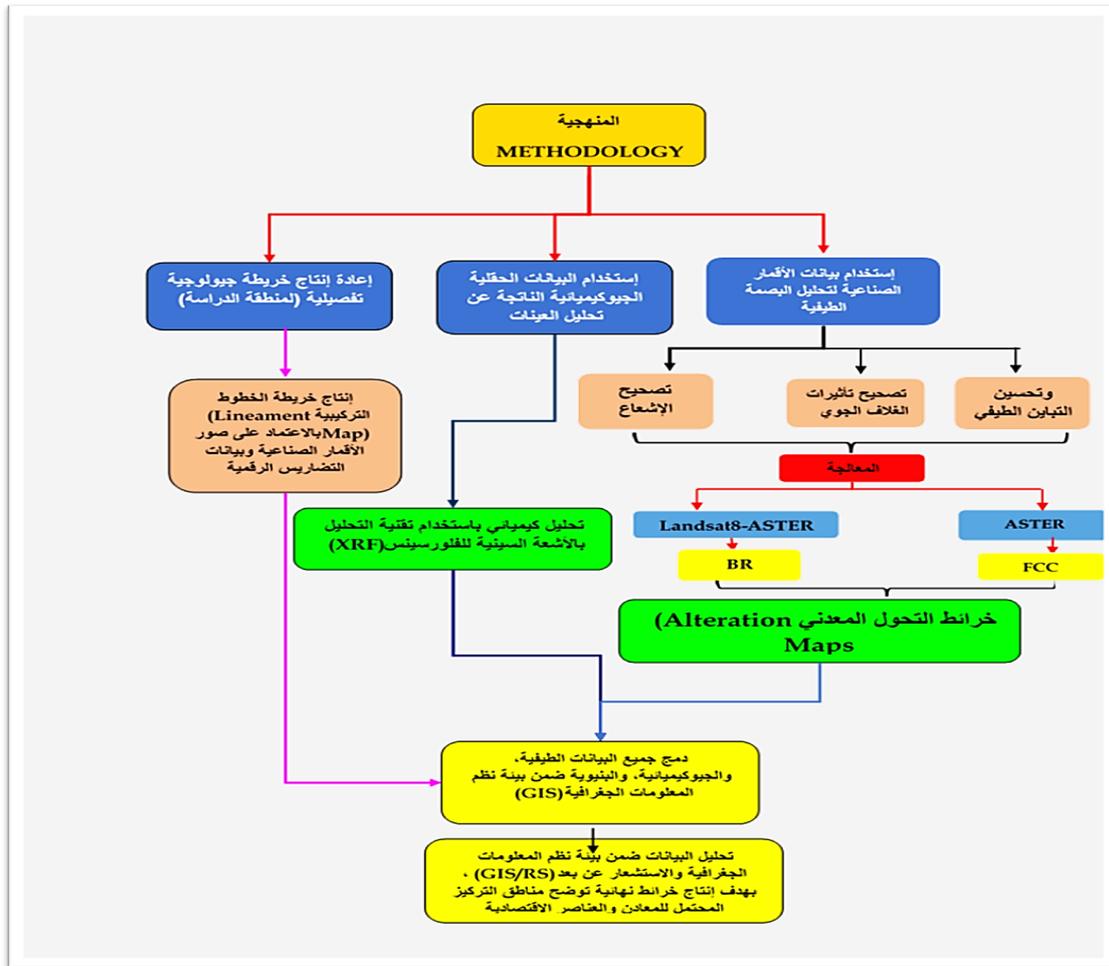
استناداً إلى النتائج السابقة التي تم الحصول عليها من خلال تحليل الصور الفضائية وتفسير المؤشرات الطيفية، جرى تنفيذ دراسات ميدانية دقيقة تهدف إلى التحقق من مدى تطابق المخرجات النظرية مع الواقع الجيولوجي. وقد شملت هذه المرحلة القيام بزيارات ميدانية إلى المواقع التي أظهرت مؤشرات طيفية واعدة، حيث تم جمع سبع عينات صخرية مختارة بعناية، مع تسجيل إحداثياتها الجغرافية بدقة عالية باستخدام أجهزة تحديد المواقع GPS. خضعت هذه العينات لتحليل كيميائي باستخدام تقنية الفلورسينس بالأشعة السينية (XRF)، وذلك في مختبرات هيئة الطاقة الذرية الأردنية المعتمدة. وقد ساهم هذا التحليل في الكشف عن تراكيز العناصر الكيميائية الرئيسية والثانوية، مما مكن من مطابقة النتائج الطيفية مع تراكيب العناصر المعدنية الفعلية. وقد أظهر التحليل الجيوكيميائي تطابقاً جيداً في بعض المناطق، مما عزز مصداقية المؤشرات الطيفية وحدد أولويات جديدة للمتابعة والاستكشاف.

خامساً: التكامل داخل بيئة نظم المعلومات الجغرافية (GIS):

من أجل تحقيق تصور شامل للمعلومات المجمعة، تم دمج مختلف الطبقات الناتجة عن التحليل الطيفي، المسح الجيولوجي، والميداني الجيوكيميائي في بيئة نظم المعلومات الجغرافية (GIS) باستخدام برنامج ArcGIS. وتمت هذه العملية بدقة عالية لضمان الاتساق المكاني بين الطبقات المختلفة، ولتحقيق تحليل تكاملي يعكس الواقع الجيولوجي للمنطقة المدروسة.

واعتماداً على منهجية التقييم متعدد المعايير (Multi-Criteria Evaluation-MCE)، تم تطوير نموذج لتحديد أفضل المواقع المحتملة من حيث الأهمية الجيولوجية والاستكشافية، مع إعطاء أوزان نسبية

لكل عامل بحسب أهميته (مثل كثافة الخطوط البنيوية، التراكيب الجيولوجية، التوقعات الطيفية، وتراكيز العناصر الكيميائية). وقد أنتجت في هذه المرحلة خرائط تركيزية نهائية توضح بدقة المناطق ذات الأولوية للاستكشاف المعدني، مما يساهم في توجيه أعمال التنقيب المستقبلية بشكل أكثر فاعلية وكفاءة.



الشكل رقم (1): مخطط منهجية البحث الحالي

الدراسات السابقة في المجال الجيولوجي

- أجرى جاك (1954) سلسلة من المسوحات الجيولوجية الاستطلاعية، تمكّن خلالها من تحديد سلاسل صخرية غير مصنفة تعود إلى ما قبل الكامبري، مع وصف موجز للصخور البركانية الظاهرة بين منطقتي شقرة وأحور. وقد لاحظ في منطقة شقرة وجود طبقات رقيقة من الحمم البركانية تخترق رواسب الرمال في السهل الساحلي.

- أعد بيدون (1960، 1964، 1966) مجموعة من الخرائط الجيولوجية بمقاييس مختلفة تتراوح بين 1:50,000 و1:1,000,000، موضحًا من خلالها الوحدات الصخرية التي تتضمن الأساسات المتحولة والتكوينات الرسوبية المغطية لها.
- درس غرينوود وبليلي (1967) التكوينات الجيولوجية في أراضي محمية عدن الغربية السابقة، حيث خلاصا إلى أن أقدم الصخور المكشوفة في منطقتي نصاب وسعيد تتكون من صخور الجرانيت والجرانوديوريت التي تعود إلى ما قبل الكامبري، وأطلقا عليها تسمية "الشيست القديم". كما أوضحا أن الصخور المنتمية إلى العصر البروتروزوي الأعلى، والتي تشمل الشيستات، والجنيسات، والكوارتزيتات، والرخام، والأنيسيتات المتحولة، تندرج ضمن مجموعة "عدن المتحولة"، التي تعرضت لعمليات تحول إقليمي نتج عنها تكوّن واجهات من الشيست الأخضر، والألبايت-إبيدوت، والأمفيبوليت. وفقًا لـ غرينوود، فإن الجرانيتات المتزامنة مع الحركات التكتونية قد تكونت بشكل واسع أثناء مرحلة من التحول الإقليمي يزيد عمرها عن 600 مليون سنة، بينما تم ترسيب صخور الديوريت، والتوناليت، والجابرو في مرحلة لاحقة. وقد تم تحديد عمر الجرانيتات وصخور الجابرو اللاحقة باستخدام طريقة التأريخ بالبوتاسيوم-أرجون، حيث تراوحت الأعمار بين 560 و475 مليون سنة.
- أجرى مزولفسكي وآخرون (1974) مسوحات جيولوجية تفصيلية في منطقتي لودر ومودية بمقياس 1:50,000، بالإضافة إلى منطقة عتق بمقياس 1:25,000، وأسفرت أعمالهم عن اكتشاف راسب من الألبايت-تيتانوماجنيتيت في منطقة المكيراس، وتواجد معدني للتيتانوماجنيتيت في عتق، فضلًا عن تسجيل بيجماتيتات حاوية لمعادن نادرة في مناطق مودية، لودر، ونصاب.
- نفذ ماركرتشيان وآخرون (1977) مسوحات جيولوجية وجيوفيزيائية في مناطق لودر، ريمارث، وعتق باستخدام مقياس 1:2000 و1:10,000، حيث تم اكتشاف بيجماتيتات حاملة لعناصر معدنية نادرة في منطقة لودر. شملت دراستهم الخصائص الشكلية والمعدنية والكيميائية لهذه البيجماتيتات وتفسير منشأها الجيولوجي. وقدرت الدراسة الاحتياطات المعدنية التقديرية بحوالي 100-120 ألف طن من أكاسيد العناصر الأرضية النادرة (TR_2O_3)، بالإضافة إلى 10 آلاف طن من أكسيد النيوبيوم (Nb_2O_5)، و100-250 ألف طن من الباريوم.
- أجرى شيرنوف وآخرون (1978) مسوحات جيولوجية إقليمية في منطقتي ريباط ونصاب، وخلصوا إلى أن راسب العناصر النادرة في نصاب (I)، II، III تُعد غير واعدة اقتصاديًا، وأوصوا بتركيز الاستكشافات المستقبلية على الرواسب المعدنية المتنقلة للعناصر النادرة.
- أما أبيوف وآخرون (1981)، فقد قاموا بتقييم تفصيلي لمنطقة الكربوناتيت في لودر باستخدام مقياس 1:10,000، حيث درسوا الشكل الهندسي للخامات وتركيبها المعدني والكيميائي حتى عمق 350 مترًا. قدرت نتائج الدراسة احتياطي الخام بنحو 27.7 طنًا من TR_2O_3 بمتوسط تركيز 3.8%، بالإضافة إلى 14.5% من عنصر البيريليوم. ومع ذلك، فقد أوصت الدراسة بعدم متابعة أعمال الاستكشاف الإضافية نظرًا لانخفاض حجم الاحتياطيات المكتشفة.
- أجرى لوبونيتس وزابرودين (1990) دراسة جيولوجية تفصيلية في منطقة لودر بمحافظة أبين، وذلك

ضمن إطار عمل ميداني أشرف عليه فريق علمي تابع لدائرة المسح الجيولوجي في عدن. ركزت الدراسة على تحليل الخصائص الجيولوجية والبنائية للمنطقة ضمن سياق جيولوجي إقليمي، وساهمت في توثيق البنية الصخرية وتفسير التراكيب الجيولوجية المحلية. وقد تم إعداد الخريطة الجيولوجية التفصيلية للوحة D38-80 كأحد المخرجات الرئيسية لهذا العمل، موفرة تمثيلاً دقيقاً للوحدات والتكوينات الصخرية في المنطقة. وقد خضعت هذه الدراسة لمراجعة علمية من قبل البروفيسور ن. أ. بوجكو من قسم الجيولوجيا بجامعة موسكو الحكومية، ما يعزز من موثوقية النتائج التي تم التوصل إليها.

الدراسات السابقة المحلية في المجال الاستشعار عن بعد

- نفذ علي وآخرون (2009) عملية معايرة طيفية لبيانات ASTER و ETM+ باستخدام طريقة الخط التجريبي (Empirical Line) في شمال شرق محافظة حجة، وبيّنت الدراسة أهمية المعايرة الدقيقة في تعزيز دقة التمييز الطيفي بين التكوينات الصخرية المختلفة.
- استخدم النهي وآخرون (2015) بيانات القمرين الصناعيين Landsat 8 OLI و ASTER في منطقة المحبشة بمحافظة حجة، لاستخراج الخطوط البنيوية والتكتونية الكبرى وتحليل توزيعها المكاني، بما يعكس البنية الجيولوجية العميقة للمنطقة، وقد أظهرت النتائج فعالية المؤشرات الطيفية في إبراز اتجاهات الفوالق والصدوع الرئيسية.
- أجرى الخنبري وآخرون (2016) دراسة جيولوجية طيفية في منطقة المغربه بمحافظة حجة، اعتمدوا فيها على صور Sentinel-2 بهدف تحسين دقة التكوينات الصخرية ورسم خريطة جيولوجية محدثة عبر تطبيق تقنيات التصنيف الطيفي.
- أجرى عرفات محمد ومحمد الشائف (2017) دراسة استكشافية في منطقة عياد بمحافظة شبوة، بهدف تحديد المناطق ذات الاحتمالية العالية لتراكمات الهيدروكربونات، وذلك باستخدام تقنيات نظم المعلومات الجغرافية (GIS) بالاعتماد على نموذج التريجيج الخطي (WLC) وأسلوب التحليل الهرمي (AHP). استندت الدراسة إلى دمج ثمانية عوامل جيولوجية وجيوفيزيائية مكانية، من بينها عمق القاعدة، وخرائط السماكات الطباقية، ونظام الصدوع تحت السطحية، وخرائط الشذوذ الجاذبي. وقد ساهم هذا الدمج في إنتاج خريطة تصنيفية لاحتمالية وجود النفط والغاز، توافقت بدرجة عالية مع مواقع الآبار المنتجة وحقول النفط المكتشفة في المنطقة، ما يعكس فعالية النمذجة الرقمية كأداة داعمة في الاستكشاف الهيدروكربوني.
- حلّل الضراب وآخرون (2018) الصور الفضائية لمنطقة العرصة في شبوة باستخدام مرئيات Landsat، بهدف تفسير التراكيب الخطية ومقارنتها مع الظواهر البنيوية السطحية، وأسفر التحليل عن تحديد شبكة من الخطوط التكتونية المتقاطعة التي تُظهر أنماط التشوه البنيوي في المنطقة.

• دمج فرج وآخرون (2019) بيانات ASTER وLandsat مع قياسات كهرومغناطيسية منخفضة التردد (VLF-EM) لتحديد مناطق التحويلات الهيدروحرارية في وادي البنا، جنوب اليمن، حيث ساهم الجمع بين المؤشرات الطيفية والقياسات الأرضية في تحسين القدرة على تمييز البيئات الحاملة للمعادن.

الدراسات السابقة الخارجية في المجال الاستشعار عن بعد

• نفذ الحربي وآخرون (2008) دراسة جيولوجية في منطقة عرفات بمكة المكرمة (السعودية)، استخدموا فيها بيانات ASTER وLandsat لإنتاج خريطة جيولوجية محدثة لصخور القاعدة، مع التركيز على تحسين تمييز الوحدات الصخرية والخطوط البنيوية. وقد أظهرت الدراسة كفاءة بيانات ASTER الطيفية في التعرف على الصخور المتحولة والرسوبية وتحديد مناطق التحويلات الهيدروحرارية.

• أجرى عبد الله وآخرون (2012) دراسة استكشافية في منطقة العبيدية شمال السودان، اعتمدوا فيها على تقنيات المعالجة الطيفية لمريثات Landsat ETM+ بهدف تعزيز ظهور الخطوط البنيوية والتراكيب الخطية. وبيّنت الدراسة مدى فعالية هذه التقنية في تفسير نمط التشوه البنيوي وتحديد الاتجاهات الجيولوجية في المنطقة.

• استخدم الهاشمي وآخرون (2020) بيانات Landsat 8 وتقنيات التحليل المكاني بنظام GIS في حوض نهر خازر شمال العراق، لرسم خرائط احتمالية وجود المياه الجوفية. تم تحليل ثمانية معايير مكانية باستخدام طريقة AHP، وأسفرت النتائج عن خريطة موثوقة لمناطق التغذية المائية، بما يدعم اتخاذ القرار في تخطيط الموارد المائية.

• دمج العامري وآخرون (2021) في سلطنة عمان بيانات Sentinel-2 مع معطيات الطبوغرافيا الجيولوجية لتحديد التراكيب الصخرية والبنية الجيولوجية في منطقة وادي الكبير. وبيّنت الدراسة قدرة المؤشرات الطيفية على عزل وحدات الصخور البركانية والرسوبية، إضافة إلى تحديد الصدوع والفوالق النشطة.

• نفذت هند صديق (2024) دراسة دكتوراه في منطقة جالا سوفار بالسودان، ركزت على تطبيق تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية (GIS) في مجال الاستكشاف الجيولوجي ورسم خرائط التحويلات الهيدروغرافية. استخدمت الدراسة بيانات الأقمار الصناعية Landsat 8 و Sentinel 2 وASTER، وتم تطبيق تقنيات معالجة طيفية متقدمة مثل (SAM، MTMF، Matched Filtering)، إلى جانب التحليل المخبري باستخدام الطيف الفائق (ASD) لعينات ممثلة من الصخور. وأسفرت النتائج عن إنتاج خريطة جيولوجية محدثة بدقة 1:25,000، بيّنت توزيع الوحدات الصخرية والتحويلات الحرارية بدقة عالية. وأكدت الدراسة فعالية التكامل بين التحليل الطيفي والمعانيات

- الحقلية في تحسين كفاءة عمليات التنقيب المعدني في المناطق شبه القاحلة.
- جرى أوكونوميديس وآخرون (2009) دراسة جيولوجية في منطقة مقدونيا الشمالية باليونان، استخدموا فيها صور Landsat 7 ETM+ وASTER متعددة التواريخ، بهدف إنتاج خريطة جيولوجية محدثة ودقيقة باستخدام تقنيات نظم المعلومات الجغرافية (GIS). وقد أظهرت الدراسة توافقًا ملحوظًا بين المعالجة الرقمية للصور الفضائية والخرائط الجيولوجية الحقلية في تحديد الخطوط البنيوية والوحدات الصخرية المختلفة.
 - طبق أناستاسيو وآخرون (2019) تقنيات التحليل الطيفي في جزيرة نيسيروس، إحدى الجزر البركانية جنوب اليونان، باستخدام بيانات Sentinel 2 وLandsat 8 وASTER، بغرض تمييز مناطق التحوير الهيدروحراري داخل فوهة البركان Lacchi. ونجحت الدراسة في تحديد نطاقات التحوير الطيفي والمعادن السطحية، ما يبرز كفاءة التقنيات الطيفية في البيئات البركانية النشطة.
 - أعد ميرمازلومي وآخرون (2022) خريطة تغطية استخدامات الأراضي الأوروبية بدقة 10 أمتار (ELULC 10)، من خلال دمج بيانات Sentinel 1/2 وLandsat 8 باستخدام منصة Google Earth Engine. وغطت الدراسة القارة الأوروبية كاملة، وقدمت نموذجًا متكاملًا في تحليل البيانات المكانية لرسم خرائط بيئية وجغرافية دقيقة.
 - نفذت مجموعة بحث أوروبية (2024) دراسة في منطقة الحوض الهيدروحراري جنوب غرب فرنسا، دمجت فيها بيانات Landsat 9 وASTER مع معطيات جيوفيزيائية جوية لتحديد مناطق التحويرات الحرارية المرتبطة بالتمعدنات. وقد ساهم هذا التكامل بين تقنيات الاستشعار عن بعد والمصادر الجيولوجية الأرضية في تحسين كفاءة الكشف عن المناطق ذات الاحتمالية المعدنية العالية.

أدوات الدراسة البرامج والبيانات وSoftware and Datasets

في إطار هذه الدراسة، تم استخدام مجموعة من البرامج المتخصصة التي أسهمت في تنفيذ مراحل التحليل الطيفي، المسح الجيولوجي، الجيوكيميائي، والمكاني بشكل تكاملي ومنهجي. وتوزعت الأدوار الوظيفية لهذه البرامج على النحو الآتي:

• برنامج ENVI 5.6:

استخدم برنامج ENVI (الإصدار 5.6) لتحليل البصمة الطيفية للبيانات الفضائية، واستخلاص المؤشرات الطيفية المرتبطة بالتحويرات الهيدروحرارية وتمعدنات المعادن السطحية. مكن البرنامج من التعامل مع النطاقات الطيفية المختلفة، وحساب مؤشرات المعادن، مما ساعد في تحديد المناطق ذات الأولوية الاستكشافية.

• برنامج ArcGIS:

تم استخدام برنامج ArcGIS (الإصدار 10.8) لدمج وتحليل البيانات المختلفة داخل بيئة نظم المعلومات الجغرافية (GIS)، حيث أُدرجت الطبقات الناتجة عن التحليلات الطيفية والبنوية والجيوكيميائية. كما تم تطبيق أسلوب التقييم متعدد المعايير (Multi-Criteria Evaluation - MCE) لتحديد أولويات الاستكشاف، إلى جانب إنتاج خرائط تحليلية دقيقة توضح توزيع المؤشرات مكانياً. إضافةً إلى ذلك، تم استخدام البرنامج في بناء قاعدة بيانات جيولوجية لمنطقة الدراسة وإنشاء خريطة جيولوجية تفصيلية.

• برنامج PCI Geomatica:

استُخدم برنامج PCI Geomatica (الإصدار 2020) لاستخراج الخطوط التركيبية (Lineaments) من نموذج الارتفاع الرقمي (DEM)، بالاعتماد على تحليل التغيرات المورفولوجية والانكسارات الطبوغرافية. وساهم ذلك في تحديد الفوالق والشقوق التي تعكس البنية التكتونية للمنطقة.

• برنامج QGIS:

تم استخدام برنامج QGIS (الإصدار 3.26.1) مفتوح المصدر في تحليل اتجاهات الخطوط التركيبية المستخرجة من DEM. وقد أتاح البرنامج تصنيف الاتجاهات الجيولوجية ورسمها، مما ساعد على بناء قاعدة بيانات مكانية للبنية التكتونية وتحديد الاتجاهات البنوية السائدة.

• برنامج RockWorks:

استخدم برنامج RockWorks (الإصدار 17) لإنتاج وردة الاتجاهات (Rose Diagram) بناءً على نتائج تحليل الخطوط التركيبية، ما مكّن من تمثيل الاتجاهات البنوية إحصائياً ودعم التفسير الجيولوجي البنوي، وربطها بالمؤشرات الطيفية والنتائج الحقلية الأخرى.

• برنامج Microsoft Excel:

تم الاعتماد على برنامج Excel (2010) في تنفيذ بعض العمليات الحسابية، خاصةً عند احتساب الأوزان النسبية في التقييم متعدد المعايير (MCE)، وكذلك في تنظيم البيانات الجيوكيميائية وتحليلها بطريقة جدولية داعمة للنتائج النهائية.

بيانات الصور الفضائية:

• نوع المنتجات من بيانات ASTER و Landsat 8 التي تم تنزيلها:

تضمنت البيانات الفضائية المستخدمة في هذه الدراسة مشهداً واحداً من صور القمر الصناعي ASTER، يحتوي على 9 نطاقات طيفية تغطي النطاق المرئي والأشعة تحت الحمراء القريبة (VNIR) والأشعة تحت الحمراء القصيرة (SWIR)، بدقة مكانية تبلغ 15 مترًا للنطاقات VNIR و30 مترًا

للنطاقات SWIR. كما تم استخدام مشهد من بيانات القمر الصناعي Landsat 8 OLI/TIRS (المستوى الأول - مصححة إلى 15 مترًا)، والذي يحتوي على تسعة نطاقات طيفية تشمل نطاقات OLI وTIRS، بدقة مكانية تبلغ 30 مترًا للنطاقات VNIR وSWIR، و15 مترًا للنطاق البانكروماتي (PAN)، و100 متر للنطاقات الحرارية (TIR).

تم الحصول على بيانات ASTER في تاريخ 2 فبراير 2001، وهو ما يتزامن مع فصل الشتاء حيث يكون الغطاء النباتي أقل كثافة، مما يساهم في تقليل تأثير النباتات على الإشارات الطيفية. أما بيانات Landsat 8 فقد تم الحصول عليها بتاريخ 15 أبريل 2021. وتجدر الإشارة إلى أن بيانات ASTER في نطاق SWIR بعد أبريل 2008 تعاني من تشويشات وتشبعات شاذة، ولذلك تم اختيار البيانات من الفترة المناسبة الخالية من العيوب.

• كما اعتمدت الدراسة على خرائط جيولوجية سابقة للمنطقة، تم عمل إرجاع جغرافي من أجل تحليلها وإنتاج قاعدة بيانات لمنطقة الدراسة ورسم خريطة جيولوجية باستخدام نظم المعلومات الجغرافية، وتُعد الخرائط الجيولوجية الروسية من أبرز المراجع الأساسية في هذه الدراسة، حيث تم إعدادها ضمن مشروع "Geological studies of the Aden region" عام 1990، وإنتاجها لصالح (هيئة المساحة الجيولوجية والثروات المعدنية / عدن حاليًا) (الاستكشافات المعدنية سابقًا Aden - PDRY من قبل البروفيسور N. A. Bozhko) من قسم الجيولوجيا بجامعة موسكو الحكومية. وقد ساهمت هذه الخرائط في فهم البنية الجيولوجية الإقليمية لمنطقة الدراسة، كما تم دمجها مع الخرائط الجيولوجية الورقية القديمة للمنطقة ذات الأرقام: (D-38-80)، (D-38-68)، (D-38-69)، (D-38-81)، (D-38-76)، (D-38-92). وتحويلها إلى صيغة رقمية وتحليلها جنبًا إلى جنب مع بيانات الصور الفضائية، مما أتاح مقارنة متقدمة ودقيقة بين التراكيب الجيولوجية الظاهرة على الصور وبيانات الخرائط، وأسهم في تعزيز دقة التفسير الطيفي والهيكل في الدراسة.

خصائص بيانات متعددة الحساسات:

تم استخدام صور الأقمار الصناعية متعددة الحساسات بهدف دراسة البصمة الطيفية للمعادن في منطقة لودر بمحافظة أبين. ركزت الدراسة بشكل رئيسي على استخدام بيانات Landsat 8 وASTER نظرًا لأهميتهما في تمييز التكوينات الصخرية والتمعدنات في المنطقة.

يتميز Landsat 8 بنطاقاته الطيفية العريضة التي تسمح برصد وتحديد الوحدات الصخرية ومناطق التحول على نطاق إقليمي، مما يساهم في إعداد خرائط جيولوجية أولية تغطي كامل منطقة الدراسة. أما ASTER فيتميز بنطاقاته الطيفية الضيقة والمتعددة، التي توفر دقة أعلى في تحليل وتحديد المعادن الطينية والكربونات، بالإضافة إلى مجموعات المعادن المحتوية على الحديد ($+Fe^2$) و ($+Fe^3$)، مما يمكن

من إجراء خرائط تفصيلية أكثر دقة على مستوى المعادن والخصائص المعدنية.

تم الاعتماد على الجمع بين البيانات الطيفية الواسعة لـ Landsat 8 والدقة الطيفية العالية لـ ASTER لتحقيق تحليل متكامل يمكنه الكشف عن البصمة الطيفية الدقيقة للمعادن في التكوينات الجيولوجية لمنطقة لودر، وهو أمر ضروري لدعم استكشاف المعادن في هذه المنطقة.

معالجة البيانات الطيفية لتمييز الخصائص المعدنية باستخدام مرئيات Landsat 8 وASTER:

تعد تقنيات معالجة البيانات الطيفية من الأدوات الأساسية في استخلاص المعلومات الجيولوجية الدقيقة من مرئيات الأقمار الصناعية. وتعتمد هذه التقنيات على تطبيق عمليات رياضية متقدمة لتحويل الصور بهدف الكشف عن خصائص جيولوجية مخفية مثل الامتداد السطحي للوحدات الصخرية، أنواع الصخور، البنى الجيولوجية، والمعادن الناتجة عن عمليات التحول أو التغيير الهيدروحراري.

تتضمن عمليات تحويل الصور تطبيقات رياضية على نطاقات طيفية متعددة، مثل الجمع والطرح والقسمة والنسبة، وذلك لتوليد صور جديدة تُظهر خصائص أو معالم معينة بشكل أكثر وضوحًا. وتستخدم هذه التحويلات لتحسين تباين المعادن أو الصخور التي يصعب تمييزها في الصور الأصلية. بالاستناد إلى ما ورد في الأدبيات العلمية من دراسات سابقة، تم استكشاف عدد من نسب النطاقات وتركيباتها التي أثبتت فعاليتها في التمييز بين أنواع الصخور والمعادن، ولا سيما في بيانات ASTER وLandsat 8. وقد تم في هذه الدراسة تجريب واختبار عدد من تلك النسب الطيفية والتركيبات الملائمة للمنطقة محل الدراسة، بهدف تعزيز القدرة على تمييز المعادن والرواسب المعدنية وتحديد مناطق الانكشافات الجيولوجية بدقة أكبر.

الدقة الطيفية وأثرها في تمييز المعادن باستخدام تقنيات الاستشعار عن بعد:

يعرض الجدول رقم (1) مقارنة بين المستشعرات الطيفية في القمرين الصناعيين Landsat 8 وASTER من حيث الدقة الطيفية (Spectral Range) والدقة المكانية (Spatial Resolution) وتوزيعها عبر الأنظمة الفرعية الطيفية (VNIR, SWIR, TIR). تُعد هذه الخصائص أساسية في تحليل البصمة الطيفية للمعادن، إذ تعتمد قدرة التمييز الطيفي بين أنواع المعادن على عدد الحزم تحليل البصمة الطيفية للمعادن، إذ تعتمد قدرة التمييز الطيفي بين أنواع المعادن على عدد الحزم المتوفرة، مدى أطوالها الموجية، وتوزيعها في النطاقات الحرجة مثل:

النطاق الطيفي القريب من تحت الأحمر والمرئي (VNIR):

• Landsat 8 يحتوي على حزم مرئية (Blue, Green, Red) وحزمة (NIR (Band 5)، بدقة مكانية 30 كما هو موضح في الجدول رقم (1).

• ASTER يحتوي على 3 حزم في VNIR، بدقة مكانية أعلى (15 م)، مما يمنحه قدرة أفضل في التعرف

على الاختلافات الدقيقة في الانعكاسات الطيفية للمعادن وخاصة الأكاسيد مثل الهيماتيت والماغنيتيت، التي تظهر انعكاسات قوية في هذا المجال.

النطاق الطيفي قصير الموجة تحت الحمراء (SWIR):

- هذا النطاق هو الأكثر أهمية لتمييز معادن الطين مثل الكاولين والإليت، والتي تُظهر امتصاصًا واضحًا ضمن أطوال موجية محددة في هذا المجال.
- ASTER يتميز بـ 6-حزم طيفية ضيقة في SWIR (Bands 4-9) تغطي المجال من 1.6 إلى 2.43 ميكرومتر، مما يوفر قدرة فائقة على رصد الفروقات الطيفية الدقيقة بين المعادن.
- بينما Landsat 8 يحتوي فقط على حزمتين (6 و 7) في SWIR، بتغطية أوسع وأقل تفصيلًا، مما يقلل من دقته في التمييز بين المعادن المتشابهة طيفيًا.

النطاق الحراري تحت الأحمر (TIR):

- ASTER يتفوق بوجود 5 حزم طيفية في TIR، بدقة طيفية ومكانية مناسبة (90 م)، تُستخدم في تمييز بعض المعادن والتغيرات الحرارية المرتبطة بالتركيب الجيولوجي.
- Landsat 8 يحتوي على حزمتين فقط (10 و 11) في TIR، ما يحد من استخدامه في تحليل التحول الحراري للخامات المعدنية بدقة. تشير المقارنة إلى أن القمر الصناعي ASTER يتفوق من حيث الدقة الطيفية، خاصة في نطاق SWIR، ما يجعله أكثر ملاءمة لتحديد وتمييز أنماط التحول الحراري والمعادن الطينية المرتبطة بالخامات المعدنية. بينما يوفر Landsat 8 دقة مكانية أفضل في بعض الحزم، إلا أن قدرته التحليلية في النطاق الطيفي للمعادن تبقى محدودة بالمقارنة مع ASTER.

جدول رقم (1) الفعالية التقنية والأداء لمستشعرات الأقمار الصناعية LANDSAT8 & ASTER

سنة الإطلاق	الدقة المكانية (م)	النطاق الطيفي Spectral Range(μm)	رقم النطاق Band Number	النظام الفرعي subsystem	المستشعر (القمر الصناعي) Sensor
2013	15	0.500 – 0.680	PAN(8)	VNIR	Landsat8
	30	0.433 – 0.453	Coastal Aerosol(1)		
	30	0.450 – 0.515	Blue(2)		
	30	0.525 – 0.600	Green(3)		
	30	0.630 – 0.680	Red(4)		
	30	0.845 – 0.885	NIR(5)		
	30	1.560 – 1.660	SWIR(6)	SWIR	
	30	2.100 – 2.300	SWIR(7)	TIR	
	30	1.360 – 1.390	Cirrus(9)		
	100	10.60 – 11.19	(TIRS1)10		
100	11.50 – 12.51	(TIRS2)11			
1999	15	0.52 – 0.60	1	VNIR	ASTER
		0.63 – 0.69	2		
		0.76 – 0.86	3N		
		0.76 – 0.86	3B		
	30	1.60 – 1.70	4	SWIR	
		2.145 – 2.185	5		
		2.185 – 2.360	6		
		2.360 – 2.2430	7		
		2.295 – 2.365	8		

البيانات الحقلية:

وقد تم تلخيص مواقع أخذ العينات السبع، مع الإحداثيات الجغرافية لكل موقع، في الجدول أدناه (الجدول رقم 2)، وذلك ضمن إطار دراسات ميدانية نفذتها هيئة المساحة الجيولوجية والثروات المعدنية. وتهدف هذه الخطوة إلى توثيق مواقع العينات وربطها بالسجلات الجيولوجية الظاهرة في منطقة الدراسة.

كما تم جمع هذه العينات الصخرية بغرض إجراء التحليل الكيميائي باستخدام تقنية التحليل بواسطة الفلورسينس الإشعاعي (XRF). وقد أجريت التحاليل المخبرية في مختبرات هيئة الطاقة الذرية الأردنية، وأسفرت النتائج عن تحديد القيم الكيميائية للعناصر المكوّنة في تلك العينات. وسيتم لاحقاً تحليل هذه

البيانات وتفسيرها في سياق هذا البحث، بما يسهم في تعزيز الفهم الجيولوجي والبنوي للمنطقة الدراسة.
جدول رقم (2): مواقع أخذ العينات السبع، مع الإحداثيات الجغرافية لكل موقع من منطقة الدراسة

رقم العينة	خط الطول	خط العرض
Am-01	45°.93'84"	13°.81'62"
Am -02	45°.93'53"	13°.81'27"
Am -03	45°.93'46"	13°.80'89"
Am -04	45.93'45"	13°.81'15"
Am -05	45°.93'14"	13°.80'58"
Am -06	45°.94'62"	13°.80'92"
Lim-07	45°.99'19"	13°.96'28"

الإطار الجيولوجي لمنطقة الدراسة:

تقع منطقة الدراسة في مديرية لودر (خريطة رقم 2)، وتُعرف محليًا باسم "أمسلامية". وتقدر مساحة منطقة الدراسة (حوالي 325.4 كم²). تقع هذه المنطقة فوق صخور الكربونات، وصخور الجرانيت المتشققة (granitic dyke)، وصخور الجرانيت النيسية. (granitic gneiss) الكربونات، وهي الصخرة الحاملة للرواسب المعدنية الرئيسية، تظهر باللون البني عند تعرضها للعوامل الجوية، وباللون الرمادي في حالتها الطازجة. تظهر الكربونات على شكل عروق متوسطة الحبيبات، وتتكون من الكالسيت، والسيدريت، والمغنيت، والفلسبار البوتاسي، والكوارتز، والبيوتيت، والأمفيبول. يشكل المغنيت تجمعات على سطح الكربونات المكشوف، ويغطيه أكسيد الحديد الأحمر الناتج عن التجوية. تظهر عروق الكربونات ضمن صخور الجرانيت النيسية، وتكون ذات اتجاهات متغيرة، ويبلغ متوسط اتجاه العروق N70°E بزاوية ميل 60° نحو الشرق. يتراوح عرض عروق الكربونات من أقل من متر واحد إلى 25 مترًا، وتتميز بوجود أسمنت معدني كربوني على السطح. تُظهر الصخور الحاضنة (الجرانيت النيسي) تأثيرات قص متوسطة المدى بدرجات واتجاهات مختلفة.

تتركز التمعدنات بشكل أساسي في المغنيت وبعض المعادن النادرة، إلا أن المغنيت هو المعدن الأكثر وضوحًا. تم العثور على بلورة واحدة فقط من معدن النيوبيت في المنطقة المعدنية. يظهر السطح المعرض من الصخور بعض علامات السيليكاتية (silicification) والتصميم الكربوني.

الصخور والترتيب الطبقي لمنطقة الدراسة:

(Lithostratigraphy and Rock Units of the Study Area)

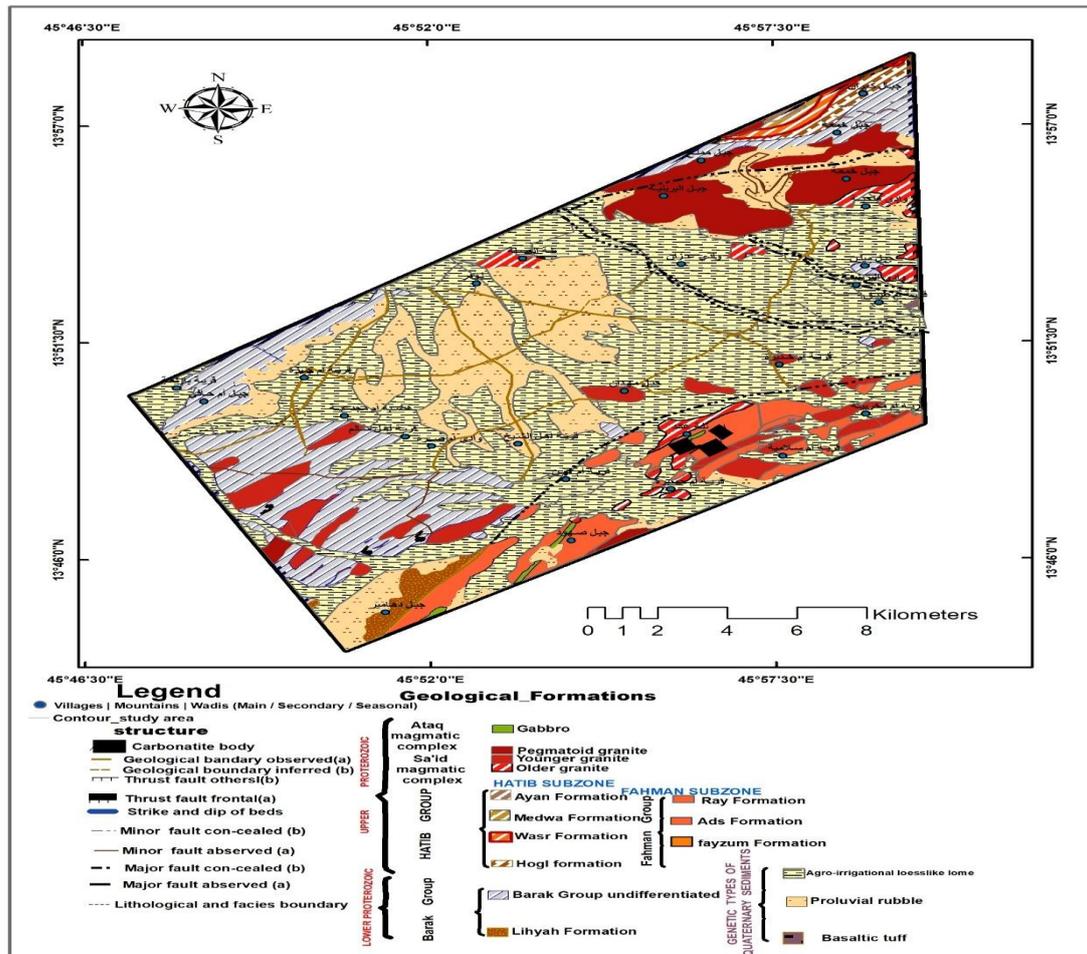
تُعد المنطقة محل الدراسة جزءًا من الدرع العربي-النوبي في الجزء الجنوبي الشرقي من شبه الجزيرة العربية. تشكل هذه المنطقة أهمية جيولوجية كبيرة نظرًا لتنوعها البنوي والتركيب الذي نشأ عبر مراحل جيولوجية متعددة. ينقسم الإطار البنوي للمنطقة إلى أربعة مراحل رئيسية: القاعدة الكريستالية (البروتروزوي)، الغطاء الرسوبي السطحي، ووحدات بركانية ناتجة عن التصدع، ومنطقة محفد التكتونية:

الإطار البنيوي (Structural Framework):

يتكون الإطار البنيوي للمنطقة من أربعة مراحل رئيسية يمكن تقسيمها على النحو التالي:

1. القاعدة الكريستالية (البروتروزوي) (Proterozoic):

تشكل هذه القاعدة الطبقات الأساسية في المنطقة وتتكون من صخور متحولة تعود إلى العصر البروتروزوي، وتعد هذه الصخور من أبرز معالم القاعدة الكريستالية التي تطورت خلال مراحل تكتونية معقدة نتج عنها صدوع وطيات ميكانيكية، وتتكون القاعدة الكريستالية من وحدات صخرية متحولة ذات تركيب معقد، حيث تبرز منطقتان تكتونيتان رئيسيتان هما: منطقة محفد ومنطقة مكيراس. وتختلف هذه المناطق في خصائصها البنيوية والتكتونية مما يستدعي دراستهما بشكل منفصل. (Lobunets & Zabrodin, 1990)



الخريطة رقم (2): الخريطة الجيولوجية لمنطقة الدراسة (المصدر: من إعداد الباحث، بالاعتماد على (USSR team 1990))

2. الغطاء الرسوبي السطحي:

يتكون هذا الغطاء من صخور رسوبية تعود للعصور الجوراسية وحتى الرباعية، وتشمل تكوينات رسوبية تم ترسيبها في بيئات متنوعة مثل البحر والشواطئ والبر.

3. الوحدات البركانية الناتجة عن التصدع:

تعود هذه الوحدات إلى العصر النيوجيني والرباعي وتتميز بتكوينات بركانية نشأت نتيجة النشاط التكتوني المصاحب للتصدع الذي أحدث تحولات في المنطقة.

4. منطقة محفد التكتونية:

تمثل منطقة محفد التكتونية جزءًا من الحزام المتحرك الذي نتج عن تصدع حدث في أواخر العصر البروتيروزوي. يتكون تكوين هذه المنطقة من مرحلتين فرعيتين:

- القاعدة السيلية من أوائل البروتيروزوي، التي تتكون من مجموعة بارك (Barak Group).
- وحدات فوقية متراكبة تشمل تكوين مشعر وتكوينات فحمان وحطيب من أواخر البروتيروزوي.

الخصائص الجيومورفولوجية لمنطقة الدراسة في مديرية لودر:

تقع منطقة الدراسة ضمن النطاق الجغرافي لمديرية لودر، الواقعة في الجزء الشمالي الشرقي من محافظة أبين، وتتميز بتضاريس متنوعة يشمل المرتفعات الجبلية، والهضاب، والسهول، وشبكة من الأودية الرئيسية والفرعية، ما يمنحها طابعًا جغرافيًا متباينًا يؤثر بشكل مباشر في استخدامات الأرض، والأنشطة الاقتصادية، وتوزيع السكان. ويمكن وصف السمات الطبوغرافية الرئيسة للمديرية على النحو الآتي:

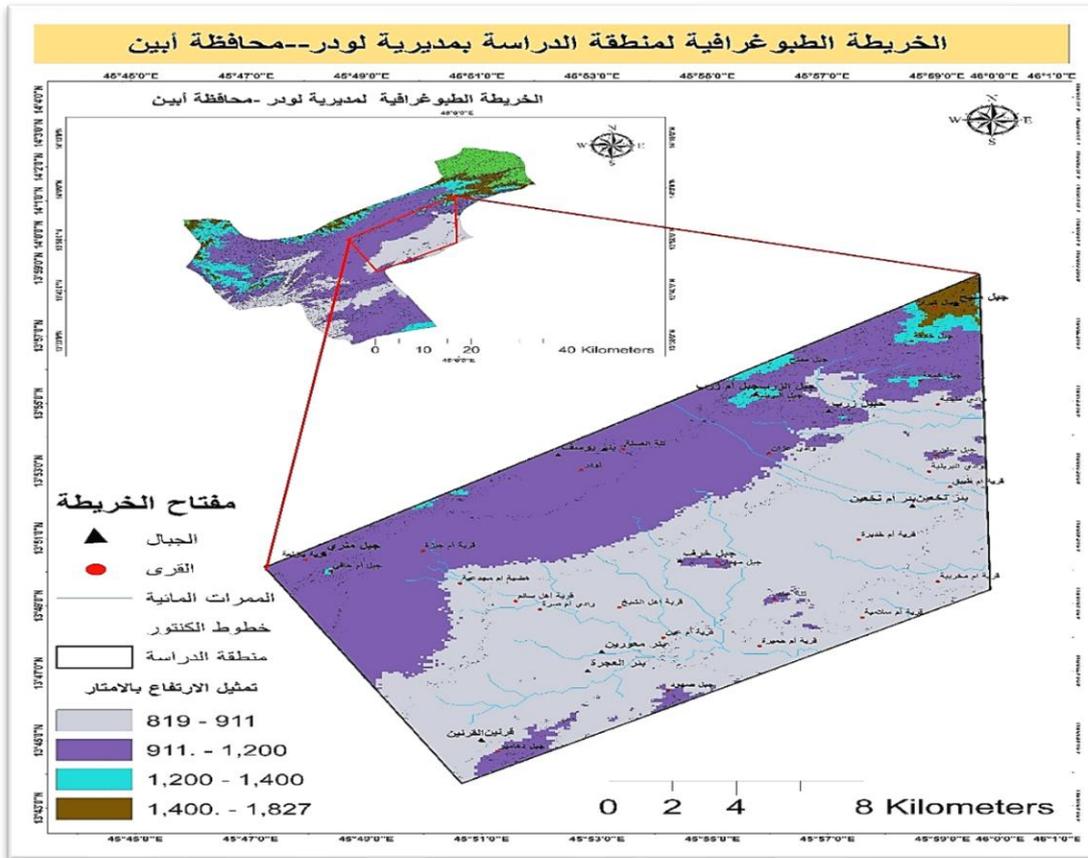
أولاً: الجبال والمرتفعات:

تُعد السلاسل الجبلية من السمات الطبوغرافية البارزة في مديرية لودر، حيث تحيط بالمديرية من جهتيها الغربية والشمالية، وتمثل امتدادًا جنوبيًا لسلسلة جبال السراة. وتضم هذه المرتفعات عددًا من الجبال والتلال المهمة من الناحيتين الجيومورفولوجية والبيئية، ومن أبرزها جبل ثرة، وجبال كبران. وتتفاوت الارتفاعات في هذه السلاسل الجبلية، حيث تصل بعض القمم إلى ما بين 1800 و2300 متر فوق مستوى سطح البحر، ما يؤدي إلى تباينات مناخية ومحلية في النظام البيئي داخل حدود المديرية.

وفي نطاق منطقة الدراسة الموضحة في الخريطة رقم (2-4)، تتركز جبال كبران في الجزء الشمالي، في حين تنتشر تلال متفرقة في الجهات الأخرى، مثل تلة "عكد" في الشرق، وتلة "العسيلة" في الغرب، وهي تشكل عناصر بارزة تؤثر في نمط الجريان السطحي والأنشطة البشرية المحيطة بها.

ثانيًا: الهضاب والسهول:

تمتد الهضاب المنحدرة عن الكتل الجبلية الرئيسية باتجاهي الجنوب والشرق، مُشكّلة نطاقًا تضاريسيًا معتدل الانحدار يُستثمر في الزراعة المطرية والرعي. وتظهر السهول الفيضية ذات الخصوبة النسبية في المناطق المنخفضة، ولا سيّما في مواضع مثل آل دَمَان والنَّخعين، حيث تُعدّ مراكز استيطانٍ زراعي يعتمد بصورة أساسية على مياه الأمطار الموسمية، كما يوضحه التوزيع المكاني في الخريطة رقم (3). ويمثل كلُّ من الهضاب والسهول العنصر الطبوغرافي الغالب في منطقة الدراسة، إذ يغطي معظم مساحتها ويتحكم في أنماط استخدامات الأرض والأنشطة الزراعية السائدة.



الخريطة رقم (3): الطبوغرافية لمنطقة الدراسة (المصدر: من إعداد الباحث بالاعتماد على بيانات DEM: ومعالجتها في برنامج GIS)

التركيب الخطية لمنطقة الدراسة:

تم الاستعانة بالصور المعالجة رقميًا من مشاهد الأقمار الصناعية Landsat 8_ASTER بالإضافة إلى خريطة الإغاثة الظلية المستمدة من نماذج الارتفاع الرقمية ASTER وSRTM، وذلك لرسم الخطوط الجيولوجية في منطقة الدراسة. كما تم الرجوع إلى الخريطة الجيولوجية رقم (4) التي أُنتجت من قبل

كثافة التراكيب الخطية:

توضح خريطة رقم (5) كثافة الخطوط الجيولوجية توزيع التراكيب البنيوية في منطقة الدراسة (مديرية لودر - محافظة أبين) بثلاثة مستويات من الكثافة (منخفضة، متوسطة، عالية)، وذلك باستخدام تحليل Kernel Density كأحد أساليب التحليل المكاني في نظم المعلومات الجغرافية. (GIS) وقد أظهرت النتائج أن المناطق ذات الكثافة العالية تتركز في الجزء الشمالي الشرقي من الخريطة، مما يشير إلى نشاط بنيوي مرتفع قد يكون مرتبطًا بصدوع أو تشققات رئيسية.

ويلاحظ أن العينات الميدانية قد تم توزيعها ضمن مناطق تتميز بكثافة متوسطة إلى عالية للخطوط الجيولوجية، مما يعزز من أهمية هذه التراكيب البنيوية في التوجيه نحو مواقع محتملة لتركيزات معدنية. وتُسهم هذه النتائج في دعم أهداف الدراسة الرامية إلى استكشاف المعادن اعتمادًا على البصمة الطيفية وتقنيات الاستشعار عن بعد، من خلال فهم العلاقة بين البنية الجيولوجية وتوزيع المؤشرات المعدنية السطحية. كما يمكن أن تشكل هذه التحليلات قاعدة معلوماتية تُستخدم لاحقًا في عمليات الدراسات الميدانية في المستقبل.

تحليل اتجاهات التراكيب الخطية:

يُعدّ تحليل الاتجاهات الخطية من الوسائل الفعالة في تفسير المعالم السطحية الجيولوجية، مثل التراكيب الخطية، مناطق الكسور السطحية، وآثار الفوالق. وتُعد واردة الاتجاهات (Rose Diagram) من أكثر الأساليب البيانية تعبيرًا لعرض بيانات الاتجاهات الخطية. في إطار هذه الدراسة، تم استخلاص التراكيب الخطية من صور الأقمار الصناعية لمنطقة الدراسة الواقعة في مديرية لودر بمحافظة أبين، وذلك باستخدام مجموعة من أدوات وتقنيات نظم المعلومات الجغرافية (GIS)، وبالاعتماد على بيئة العمل في برنامج QGIS من خلال أدوات مثل [Line Direction Histogram] و [Vector Analysis Tools]، والتي تمكّنت من تحليل وتحديد الاتجاهات الزاوية للتراكيب المستخرجة بدقة.

يُلاحظ من خلال الشكل (2)، والمدعوم بالبيانات الواردة في الجدول (3) أن التراكيب الخطية تتوزع بنمط منتظم يعكس التأثيرات البنيوية الإقليمية، وتُظهر تركيزًا واضحًا في المناطق الشمالية والمرتفعات الشمالية من جبال الملح، مما يشير إلى أن هذه المناطق أكثر تأثرًا بالعوامل البنيوية النشطة خلال الفترات الجيولوجية السابقة.

من ناحية تحليلية، يُلاحظ أن الاتجاه شرق-غرب (E-W) وشرق جنوب شرق-غرب شمال غرب ESE-WNW)) هما الأكثر تكرارًا، ويُمكن تفسير ذلك بكونهما موازيين للاتجاه العام لانفتاح خليج عدن، مما يدل على تأثير المنطقة بالقوى التكتونية الناتجة عن حركة الصفائح على حدود الصفائح العربية والصفائح الإفريقية، أما الاتجاهان شمال-جنوب (N-S) وشمال شمال غرب - جنوب شرق (NNW-SSE).

فيبدو أنهما يعكسان اتجاهات بنيوية موازية للبحر الأحمر، وهو ما يدعم الفرضية بوجود علاقة بين هذه التراكيب الخطية والحركة التكتونية الناتجة عن انفتاح البحر الأحمر.

بالتالي، فإن تحليل وردة الاتجاهات لا يُظهر فقط الأنماط البنيوية السائدة في منطقة الدراسة، بل يربطها كذلك مع الإطار التكتوني الإقليمي الذي تأثرت به المنطقة، مما يعزز من دقة تفسير مواقع التمعدن المحتملة، ويدعم التوجه نحو مزيد من الدراسة التفصيلية في تلك الاتجاهات.

تتميز منطقة الدراسة بتنوع جيولوجي كبير، حيث تشمل صخور القاعدة البلورية القديمة، وتكوينات رسوبية جيرية تعود إلى العصر الجوراسي، بالإضافة إلى وحدات بركانية حديثة من البازلت الرباعي. هذا التنوع يعكس تطورًا تكتونيًا طويل الأمد، جعل من المنطقة بيئة جيولوجية نشطة وغنية بالتحويلات البنيوية.

وتُظهر الدراسات وجود صدوع وطيّات واتجاهات تركيبية متداخلة، تدل على نشاط بنيوي كثيف في الفترات الجيولوجية الماضية، مما يجعلها بيئة مواتية لتراكم الخامات المعدنية. كما رُصدت مركبات ماغماتية مثل الجرانيت والجابرو والبيجماتيت، إلى جانب صخور الكربونات الحاملة لمعادن استراتيجية مثل النيوبيوم والباريوم وأكاسيد العناصر الأرضية النادرة.

أن تضاريس المنطقة تتنوع بين المرتفعات والهضاب والأودية، وتسود فيها الانحدارات المنخفضة إلى المتوسطة، مما يساهم في تفسير نمط التصريف السطحي ويساعد في تحليل التوزيع المكاني للتحويلات المعدنية. كما أوضح تحليل التراكيب الخطية وجود اتجاهات بنيوية سائدة مثل الشرق-الغرب (E-W) شرق جنوب شرق-غرب شمال غرب (ESE-WNW)، وهي ترتبط بمناطق التمعدن المحتملة.

تدل هذه المعطيات الجيولوجية والجيومورفولوجية على أن مديرية لودر تمتلك مقومات جيولوجية مشجعة، تجعل منها هدفًا واعدًا للاستكشاف المعدني باستخدام تقنيات الاستشعار عن بعد، خاصة في

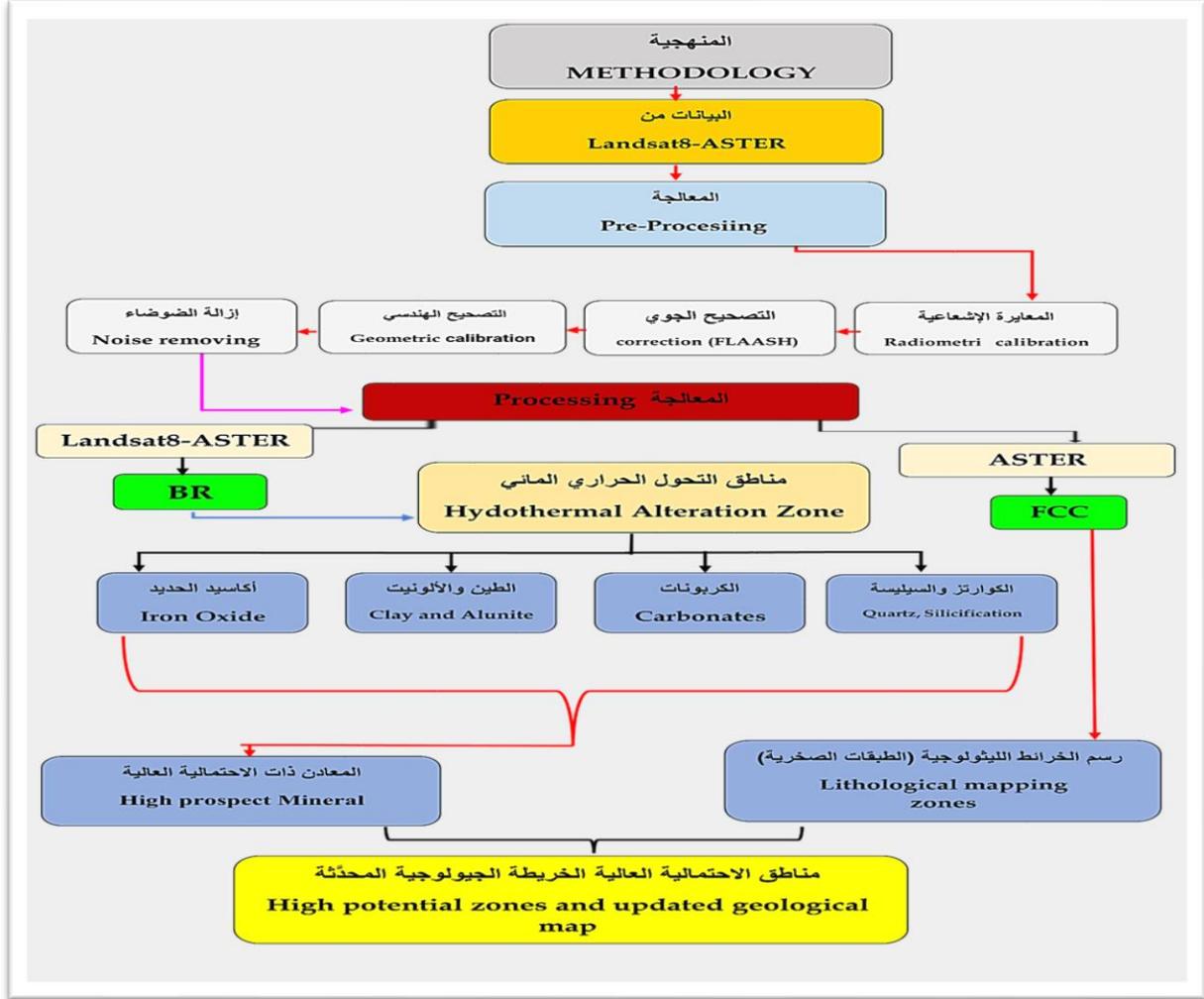
تحديد التوافق الطيفية المرتبطة بالتحويلات الهيدروحرارية والمعادن الاقتصادية.

تحليل البصمة الطيفية باستخدام الاستشعار عن بعد:

اعتمدت الدراسة الحالية على دمج تقنيات الاستشعار عن بُعد باستخدام بيانات الأقمار الصناعية (Landsat-8) و (ASTER)، بهدف استكشاف المؤشرات الطيفية المرتبطة بمناطق التحول الحراري المائي، ومن ثم تحديد المناطق ذات الإمكانيات المعدنية العالية ضمن النطاق الجغرافي لمنطقة الدراسة. بدأت المنهجية بتنفيذ سلسلة من المعالجات القبلية (Pre-processing) للمريثات الفضائية، تضمنت: التصحيح الإشعاعي (Radiometric Calibration)، والتصحيح الهندسي (Geometric Calibration)، وتصحيح الانزياح الجغرافي باستخدام نموذج FLASH، إضافة إلى إزالة الضوضاء الطيفية (Noise Removing). وقد أسهمت هذه الخطوات في تحسين جودة البيانات الطيفية ومعايرتها لتكون ملائمة للتحليل الجيولوجي اللاحق.

تم بعد ذلك تنفيذ مرحلة المعالجة الرئيسية (Processing)، والتي ركزت على استخراج مؤشرات التحول الحراري المائي من خلال:

- تحليل النسب الطيفية (Band Ratio – BR) باستخدام بيانات Landsat 8.
 - تطبيق التركيبات اللونية الكاذبة (False Color Composite – FCC) باستخدام بيانات ASTER.
 - وقد تم عبر هذه التحليلات تمييز عدد من الخصائص الطيفية المرتبطة بمعادن محددة، شملت:
 - أكاسيد الحديد (Iron Oxide) والتي تُعد مؤشراً طيفياً فعالاً في تتبع مناطق التغيرات التأكسدية السطحية.
 - الطينيات والألونيت (Clay and Alunite) المرتبطة بعمليات التحول الحراري المائي.
 - الكربونات (Carbonates) وخاصة كربونات الكالسيوم.
 - الكوارتز والسيليكات (Quartz and Silicification) والتي تظهر في مناطق التحولات المتقدمة.
- تمت مقارنة وتكامل هذه النتائج الطيفية مع التكوينات الجيولوجية المستخلصة من الخرائط الطبوغرافية والجيولوجية لتحديد الوحدات الصخرية المرتبطة بالتمعدن. كما تم رسم خرائط تفسيرية تحدد المناطق الأكثر احتمالاً لوجود تمعدنات استراتيجية (High Prospect Zones)، وربطها بأنماط التحول الحراري.
- وفي المرحلة النهائية، ساهم دمج النتائج في إنتاج خريطة محدثة للمنطقة، توضح التوزيع المكاني للوحدات الجيولوجية والمعادن ذات القيمة الاقتصادية، مع اقتراح مناطق ذات أولوية عالية للاستكشاف المستقبلي، مما يدعم الاستثمار المستدام للموارد المعدنية في المنطقة، كما هو موضح في الشكل (3).



الشكل (3): مخطط انسيابي لمنهجية التحليل

تحديد مناطق التحول الحراري المائي (Hydrothermal Alteration Zones):

تم في هذه المرحلة دمج نتائج التحليل الطيفي المستخلصة من تقنيتي نسب النطاقات (BR) والتركيب اللوني الكاذب (FCC) لبيانات Landsat 8 وASTER، بهدف التعرف على مناطق التحول الهيدروحراري في مديرية لودر. وتعد هذه المناطق مؤشرات طيفية أولية لوجود تراكيز معدنية محتملة. وقد تم تصنيفها استناداً إلى خصائصها الطيفية إلى أربعة أنواع رئيسية:

- مناطق غنية بأكاسيد الحديد (Iron Oxides): وتشير إلى عمليات أكسدة سطحية ترتبط غالباً بالأنشطة الهيدروحرارية.
- مناطق تحتوي على معادن الطين والألونيت (Clay and Alunite): وتدل على وجود بيئات منخفضة الحرارة ملائمة لتراكم بعض المعادن الاقتصادية.

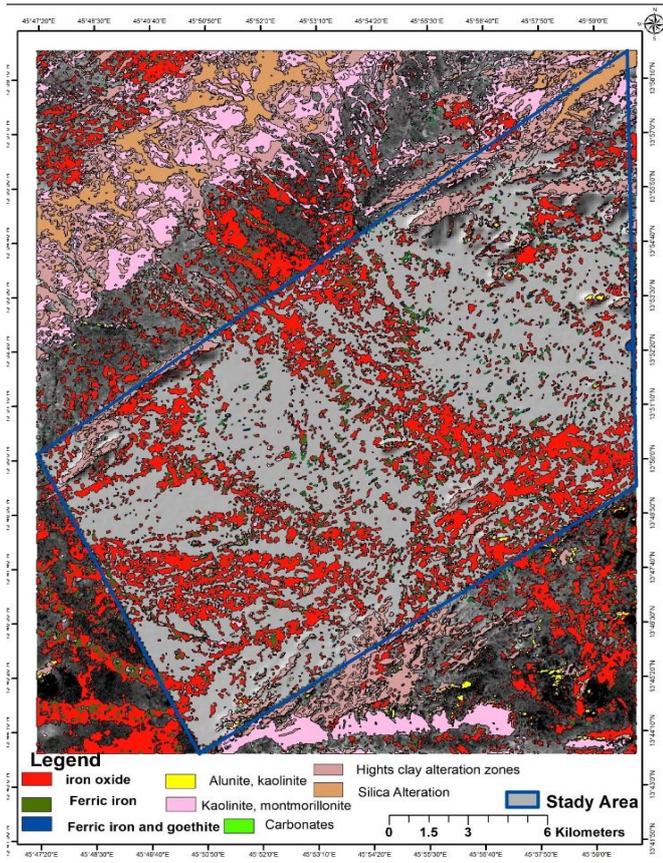
• مناطق ذات طابع كربوناتي (Carbonates): ترتبط بتفاعلات كيميائية قد تكون مرتبطة بتحولات حرارية هيدروكيميائية.

• مناطق تميزت بوجود السيليكات والكوارتز (Quartz and Silicification): وهي من أهم مؤشرات التحول الحراري المائي وتشير إلى إمكانية وجود رواسب معدنية خفية أو أولية.

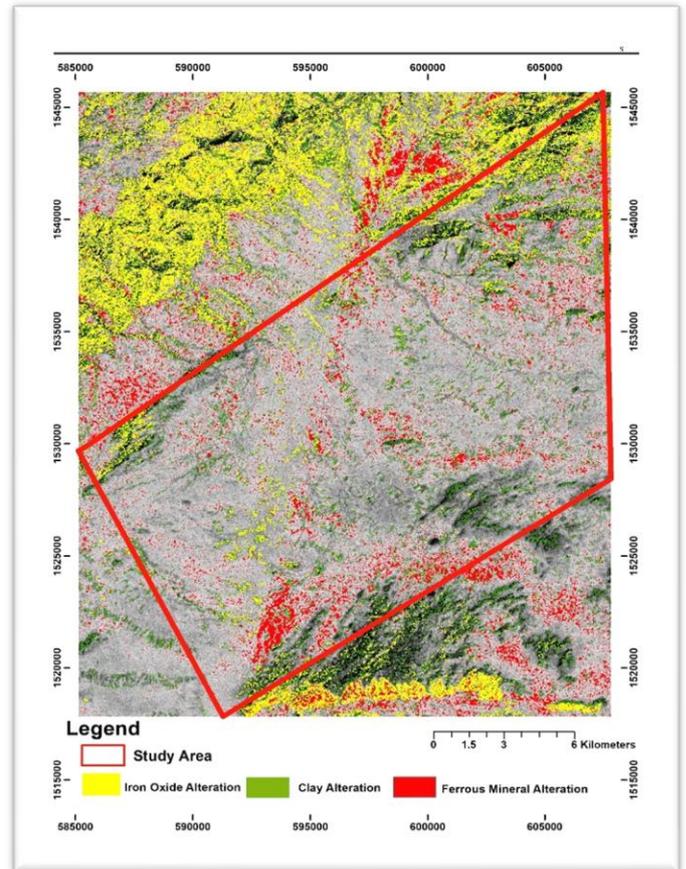
رسم الخريطة الجيولوجية المحدثة (Updated Geological Mapping):

تم في هذه المرحلة توظيف نتائج التحليل الطيفي لتحديث الخريطة الجيولوجية لمديرية لمنطقة الدراسة، من خلال اشتقاق وحدات صخرية جديدة وتحديد التوزيع المكاني لمناطق التحول الهيدروحراري، كما هو موضح في الخريطة (6) المعتمدة على مرئيات Landsat 8، والخريطة (7) المستخرجة من مرئيات ASTER.

وقد ساهم هذا التحديث في إبراز الطبقات الجيولوجية التي يُحتمل ارتباطها بالتمعدن، وتحديد المناطق ذات الاحتمالية العالية للاستكشاف المعدني High Potential Zones.



خريطة (7): توضح المعادن ومناطق التحوير باستخدام صورة القمر الصناعي ASTER



خريطة (6) توضح المعادن ومناطق التحور باستخدام مرئية Landsat 8.

التحليل الجيوكيميائي والمكاني لتحديد المناطق الواعدة تمعدنياً:

سيتم استعراض المنهجية العلمية المتبعة في تحليل وتحديد المناطق ذات الاحتمالية العالية للتمعدن في منطقة الدراسة، وذلك من خلال الدمج بين تقنيات الاستشعار عن بُعد باستخدام بيانات القمر الصناعي ASTER، والتحليل الجيوكيميائي لعينات الصخور، بالإضافة إلى التحليل البنيوي المعتمد على توزيع الفواصل والتراكيب الخطية (Linements).

ويُوضح الشكل (4) الإطار العام لهذه المنهجية، والذي يعتمد على تسلسل من الخطوات التحليلية المترابطة. وقد تم تطوير إطار تحليلي متكامل يتدرج عبر سلسلة من الخطوات العلمية تبدأ باستخلاص المؤشرات الطيفية المرتبطة بالمعادن والتحورات الهيدروحرارية من صور القمر الصناعي ASTER، ومن ثم تحليل بيانات العناصر الكيميائية الأساسية والثانوية لعدد من العينات الصخرية المأخوذة ميدانياً. وقد جرى إعادة تقييس هذه البيانات وتحويلها إلى طبقات مكانية ثنائية (Binary Raster Layers)، تسهم في تفسير التوزيع المكاني للمواقع المحتملة للتمعدن.

كما تم دمج التحليل التركيبي البنيوي في هذه المنهجية، بناءً على ما تم التطرق إليه في الفصل الثاني من هذا البحث، حيث تم تصنيف شبكة الفواصل (Linements) إلى ثلاث مستويات من حيث الكثافة:

- الكثافة العالية: وتُشير إلى مناطق نشطة بنيوياً، تُعد ذات قابلية مرتفعة لتسرب المحاليل الحرمائية، وبالتالي فهي مرشحة بقوة لوجود التمعدنات.
- الكثافة المتوسطة: وتُمثل مناطق قد تأثرت بنيوياً بدرجة متوسطة، وتبقى احتمالية التمعدن فيها قائمة.
- الكثافة المنخفضة: وهي مناطق ضعيفة التأثير بالحركات التكتونية، وتُعد فرص التمعدن فيها منخفضة.

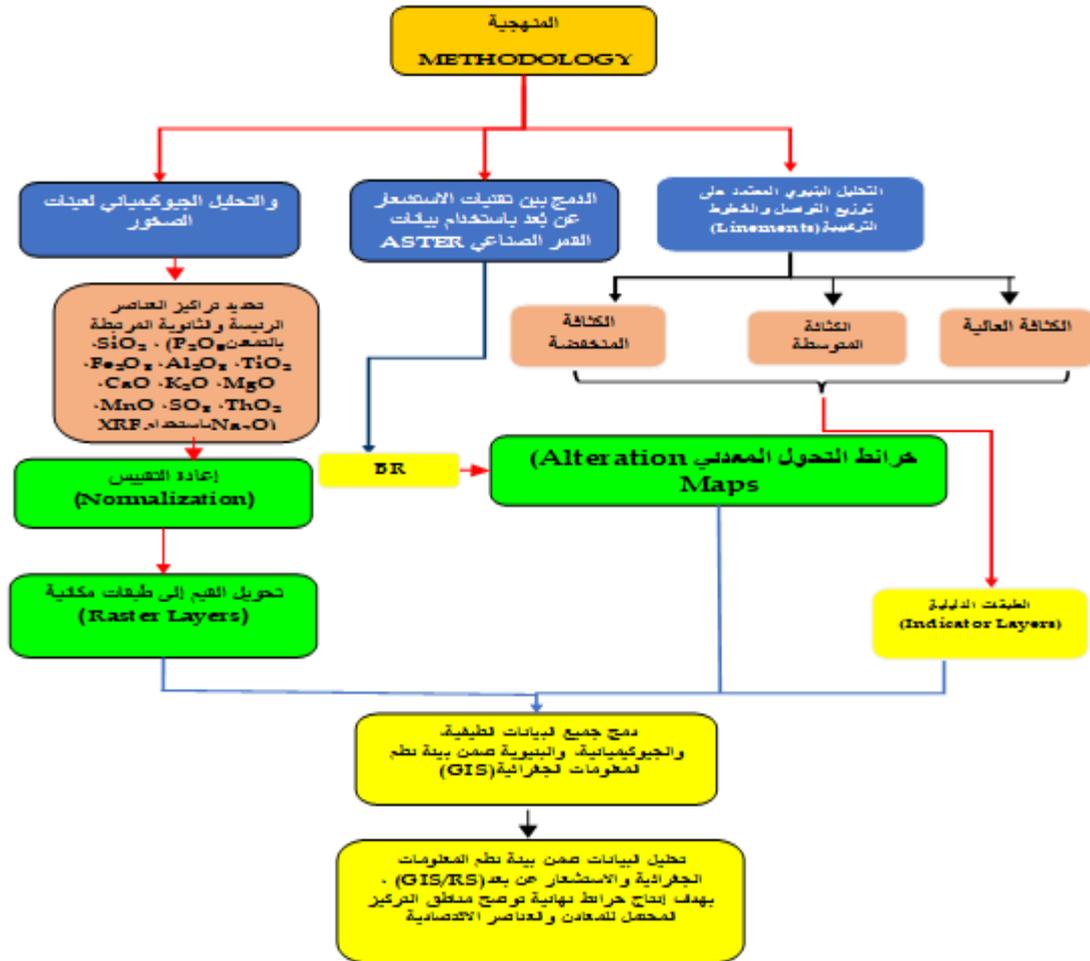
وقد أظهر هذا التصنيف البنيوي دوراً مهماً في دعم تفسير البيئات الجيولوجية المحتملة لتكوّن التمعدنات، حيث جرى تحويله إلى طبقات مكانية تم التعامل معها كأحد الطبقات الدليلية ضمن عملية التحليل المكاني

كما شملت الطبقات الدليلية أيضاً البيانات الجيوكيميائية للعناصر التالية:

Na_2O ، MnO ، SO_3 ، ThO_2 ، CaO ، K_2O ، MgO ، Fe_2O_3 ، Al_2O_3 ، $\% \text{TiO}_2$ ، $\% \text{SiO}_2$ ، $\% \text{P}_2\text{O}_5$ بعد معالجتها إحصائياً وتحديد علاقتها بمواقع التمعدن المعروفة.

وقد ساعد تكامل هذه المعطيات (الطيفية، الجيوكيميائية، والبنيوية) في إنتاج خرائط أولية للمناطق الواعدة تمعدنياً (Prospective Mineral Maps)، والتي تمثل أداة مهمة لتوجيه الدراسات المستقبلية والاستكشافات الميدانية. في الفقرات التالية من هذا الفصل، سيتم استعراض كل مرحلة من هذه

المنهجية بالتفصيل، مدعومة بالخرائط، والبيانات، وأدوات المعالجة والتحليل المستخدمة.



الشكل (4): مخطط منهجية تحليل الجيوكيميائي وتكامل مع المسح الجيولوجي

تحليل البيانات الجيوكيميائية للعينات الصخرية

يتناول هذا الجزء من الفصل تحليل البيانات الجيوكيميائية للعينات الصخرية التي تم جمعها ميدانياً من منطقة الدراسة، بهدف تحديد التراكيب الكيميائية للعناصر المرتبطة بعمليات التمعدن، واستنتاج دلالاتها الجيولوجية، ومن ثم توظيفها في بناء طبقات مكانية تُستخدم لاحقاً في تقييم وتحديد المناطق الواعدة تمعدنياً.

إعداد البيانات الجيوكيميائية:

تم إخضاع سبع عينات صخرية لتحليل مخبري دقيق باستخدام تقنية الأشعة السينية المفلورة (XRF -X-ray Fluorescence)، وهي تقنية شائعة ومعتمدة في التحليل الجيوكيميائي لقياس نسب العناصر

الكيميائية في الصخور. وقد أسفر التحليل عن تحديد تراكيز مجموعة من العناصر الرئيسية والثانوية ذات العلاقة بالبيئات المعدنية، وهي:

P_2O_5 ، SiO_2 ، TiO_2 ، Al_2O_3 ، Fe_2O_3 ، MgO ، K_2O ، CaO ، ThO_2 ، SO_3 ، MnO ، Na_2O .

تم تنظيم نتائج هذه التحليلات في جدول رقمي (الجدول 4)، حيث تُعرض التراكيز بوحدة النسبة المئوية (%) أو بالأجزاء في المليون (PPM)، وذلك حسب طبيعة كل عنصر.

ويُشكّل هذا الجدول الأساس في الخطوات اللاحقة من التحليل، والتي تشمل إعادة تقييس القيم وتحويلها إلى طبقات مكانية رقمية تُستخدم في عمليات التحليل المكاني ونمذجة توزيع التمعينات.

جدول رقم (4): نتائج تحليل سبع عينات صخرية من منطقة الدراسة باستخدام XRF

Client ID	Sample ID	P2O5 (%)	SiO2 (%)	TiO2 (%)	Al2O3 (%)	Fe2O3 (%)	MgO (%)	K2O (%)	CaO (%)	ThO2 (PPM)	SO3 (%)	MnO (PPM)	Na2O (%)
		Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.
Am-01	U2211901415	0.79	44.71	<0.049	9.19	4.44	3.20	0.45	7.26	417	3.3	2,961	6.7
Am-04	U2211901416	3.16	1.05	<0.049	<0.1	5.80	9.96	<0.049	26.20	200	5.0	6,011	<0.4
Am-05	U2211901417	2.24	5.43	<0.049	0.16	7.85	1.48	<0.049	37.17	1,088	1.1	8,501	<0.4
Am-06	U2211901418	1.46	11.59	<0.049	<0.1	8.18	0.42	<0.049	38.62	449	<0.25	8,561	<0.4
Am-10	U2211901419	<0.076	70.49	<0.049	12.33	1.63	0.51	3.63	1.09	<82	<0.25	884	4.6
Am-13	U2211901420	2.97	15.49	<0.049	2.71	3.92	11.70	0.36	26.06	<82	<0.25	5,966	1.7
LIM-7	U2409500649	0.04	68.4	<0.042	17.7	<0.51	<0.048	4.36	<0.51	<420	<0.25	/	4.96

إعادة التقييس والتحويل إلى طبقات مكانية:

من أجل دمج هذه البيانات في النماذج الرقمية، تم تنفيذ ما يلي:

إعادة تقييس البيانات (Rescaling): تم تحويل القيم الأصلية لكل عنصر إلى مقياس نسبي من 1 إلى 10 وفقاً لأعلى وأدنى قيمة داخل كل عنصر، يعرض الجدول (5) القيم المعاد تقييسها لعناصر مختارة من التحاليل الجيوكيميائية لسبع عينات تم جمعها من منطقة الدراسة. وقد تم تطبيق تقنية إعادة التقييس باستخدام المعادلة المقترحة من قبل Bonham-Carter (1994)، والتي تُحوّل القيم الأصلية إلى مقياس نسبي يتراوح بين 1 (أدنى تركيز) و10 (أعلى تركيز) حسب المعادلة:

$$\text{Rescaled Value} = \left(\frac{\text{Original Value} - \text{Min}}{\text{max} - \text{min}} \right) * 9 + 1$$

الجدول رقم (5): القيم المعاد تقييسها لعناصر مختارة من التحاليل الجيوكيميائية لعينات منطقة الدراسة

رقم العينة	خط الطول	خط العرض	Na ₂ O (%)	P ₂ O ₅ (%)	SiO ₂ (%)	TiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	CaO (%)	ThO ₂ (PPM)	SO ₃ (%)	MnO (PPM)
RDS-001	45.9384	13.8162	10.0	3.1635	6.659	1	5.6334	5.6753	3.2301	1.2025	2.6154	4.4474	6.6739	3.4349
RDS-002	45.9353	13.8127	1.0	1.0	1.0	1	1.2312	7.2468	8.6412	1.09	7.0736	2.6517	10.0	7.0106
RDS-003	45.9346	13.8089	1.0	7.3462	1.5677	1	9.6183	1.8602	1.09	9.6587	1.0	10.0	2.3696	9.9297
RDS-004	45.9345	13.8115	1.0	5.0962	2.3661	1	1.2312	10.0	1.0159	10.0	1.0	4.7122	1.0	10.0
RDS-005	45.9314	13.8058	1.0	2.0385	10.0	1	7.2446	2.4229	1.0876	8.3575	1.1625	1.0	2.35	1.0
RDS-006	45.9462	13.8092	2.8571	2.8571	2.8715	1	2.3084	5.072	10.0	1.0	7.0424	1.0	1.0	6.958
RDS-007	45.9919	13.9628	7.5143	7.5143	9.7291	1	1.0	10.0	1.0	10.0	1.0	1.0	1.0	0.0

وتهدف هذه الخطوة إلى توحيد مدى التوزيع القيمي للعناصر الكيميائية المختلفة، مما يسهل دمجها لاحقاً في نموذج التقييم المكاني عبر نظم المعلومات الجغرافية (GIS). وتشمل العناصر المعاد تقييسها في الجدول كل من:

Na₂O ، P₂O₅ ، SiO₂ ، TiO₂ ، Al₂O₃ ، Fe₂O₃ ، MgO ، K₂O ، CaO ، ThO₂ ، SO₃ ، MnO.

ويلاحظ من خلال النتائج أن العينة رقم RDS-001 مثلاً، سجّلت أعلى قيمة نسبية لعنصر Na₂O ، بينما تميزت العينة RDS-007 بتركيز مرتفع لعناصر SiO₂ و ThO₂ و K₂O ، مما قد يشير إلى بيئة جيولوجية مميزة من حيث إمكانية التحوير المعدني أو وجود مؤشرات أولية للتمعدن. تُعد هذه القيم بعد إعادة التقييس مدخلاً أساسياً في عملية بناء خريطة التناسب الجغرافي باستخدام أدوات التحليل المكاني في بيئة GIS، إذ تُدمج هذه القيم لاحقاً في عملية الترجيح أو التراكم الخطي للوصول إلى مناطق التناسب الأعلى للاستكشاف المعدني.

- التحويل إلى طبقات Raster: بعد التقييس، تم إنشاء طبقات مكانية (Continuous Raster Layers) باستخدام برامج ArcGIS، وذلك بناءً على إحداثيات نقاط أخذ العينات.
- التحويل إلى طبقات ثنائية (Binary Layers): تم تصنيف كل طبقة إلى منطقتين:
 - القيم العالية (تشير إلى احتمالية وجود تمعدن، تُعطي قيمة 1).
 - القيم المنخفضة (تُعطي قيمة 0).

بناء التحليل المركب باستخدام Raster Calculator:

في إطار التحليل المكاني متعدد المعايير ضمن بيئة نظم المعلومات الجغرافية (GIS)، تم توظيف أداة

Raster Calculator في برنامج ArcGIS بهدف تنفيذ ما يُعرف بـ "التحليل المركب" (Composite Analysis)، والذي يُعد من الأساليب الفعّالة لدمج طبقات بيانات مكانية مختلفة في طبقة واحدة تُعبر عن التناسب المكاني الإجمالي للمناطق المدروسة.

وقد استند هذا التحليل إلى الطبقات الناتجة عن إعادة تقييم مجموعة من العناصر الجيوكيميائية المرتبطة بعمليات التمدن، حيث تم تحويل كل عنصر إلى طبقة مكانية مستمرة وفق مقياس موحد، مع مراعاة التوزيع الإحصائي للقيم داخل كل طبقة.

ولإعطاء كل عنصر وزنه الحقيقي في التأثير الجيولوجي، تم إسناد أوزان نسبية (Weights) إلى كل طبقة، استناداً إلى مدى ارتباط العنصر بمؤشرات التمدن المعروفة، إضافة إلى الأدبيات الجيولوجية ذات الصلة التي تؤكد أهمية كل عنصر في البيئات المعدنية المختلفة.

وقد تم دمج هذه الطبقات في صيغة معادلة خطية داخل أداة Raster Calculator، بحيث يُضرب كل عنصر (أو طبقة) بمعامل الوزن الخاص به، وتُجمع النتائج في طبقة واحدة نهائية تُعبر عن خريطة التناسب المكاني للتمعدنات (Suitability Map) وذلك وفقاً للمعادلة الآتية:

$$\text{Composite_Suitability} = (L1 \times W1) + (L2 \times W2) + \dots + (Ln \times Wn)$$

بحيث:

- L: الطبقة المعاد تقييمها.
- W: الوزن النسبي المخصص لها.

وقد أسهم هذا التحليل في إنتاج طبقة جديدة تمثل التناسب المكاني للاستكشاف المعدني بدرجات متفاوتة، تُستخدم لاحقاً في التصنيف وتحديد المناطق ذات الأولوية العالية.

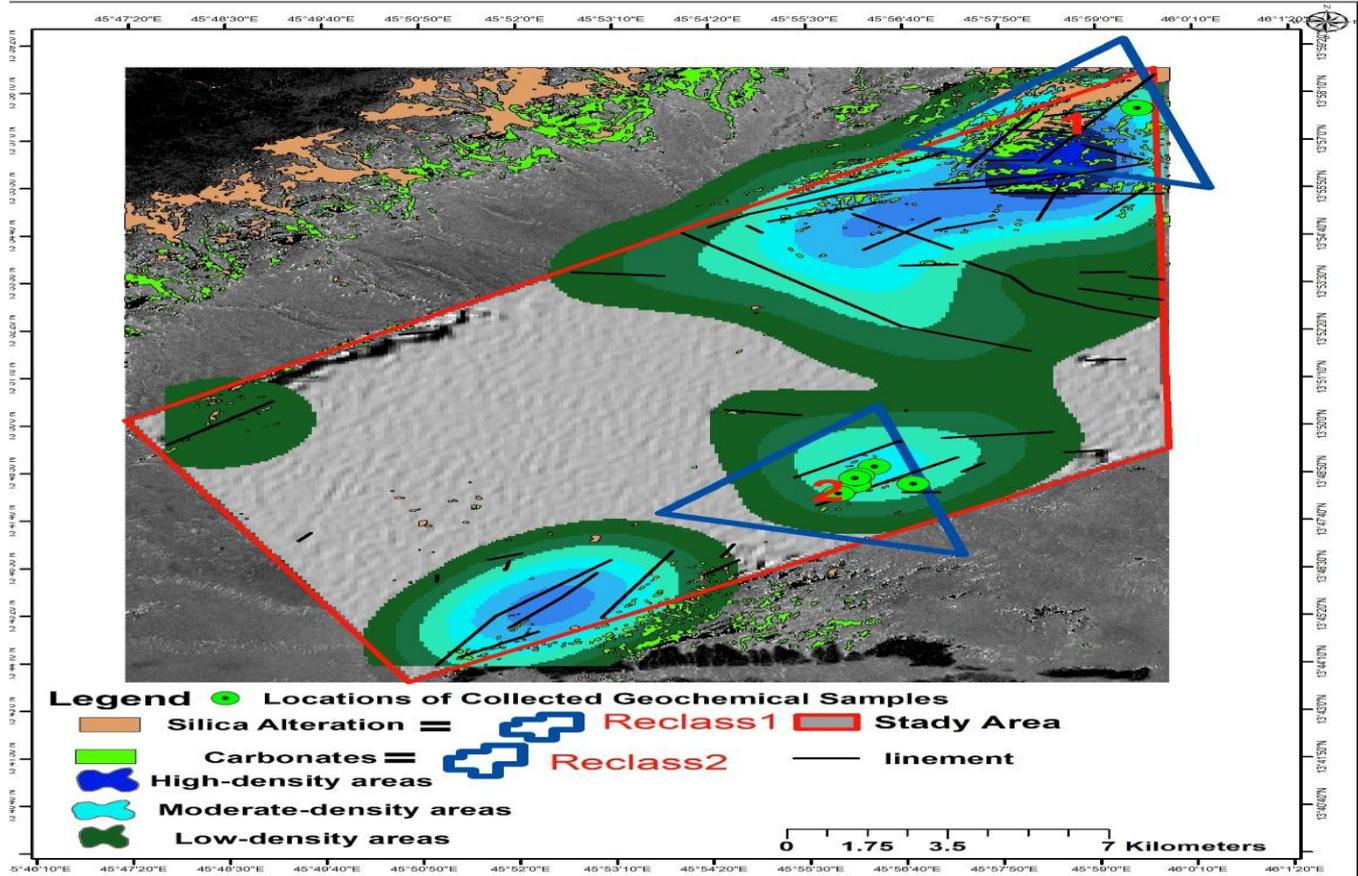
قد تم اعتماد هذه المنهجية بالاستناد إلى ما ورد في دراسات متعددة من أبرزها ما قدمه Bonham- Carter, 1994 في إطار التحليل المكاني المتعدد المعايير داخل نظم المعلومات الجغرافية لتقييم الاحتمالية الجيولوجية. وأيضاً أوضح ذلك Mohammed Arafat وAlshayef (2017) في دراستهم بمنطقة عياد في اليمن باستخدام تقنية AHP.

خريطة التناسب المكاني للتمعدنات (Prospective Mineralization Map):

أظهرت نتائج عملية إعادة التصنيف (Reclassification) للخريطة المركبة رقم (8) مدى نجاح التكامل البنيوي والتحليلي بين البيانات الجيوكيميائية المعاد تقييمها، والمؤشرات الطيفية المستخرجة من مرئيات القمر الصناعي ASTER، إلى جانب المعلومات البنيوية الناتجة عن تحليل شبكة الفواصل والانكسارات الصخرية. وقد أسهم هذا التكامل في إنتاج خريطة للتناسب المكاني للتمعدنات تعكس بوضوح مناطق التباين في الإمكانيات المعدنية داخل منطقة الدراسة، وفق أسس علمية مدروسة تعتمد

على المؤشرات الجيولوجية المتعددة. ويُعد هذا التصنيف المكاني الناتج مرحلة محورية في بناء الخريطة الأولية للاستكشاف المعدني (Prospective Mineralization Map)، حيث يمكن الاعتماد عليها كأداة إرشادية فعالة في توجيه الحملات الميدانية المستقبلية، سواءً في تحديد مواقع التنقيب الجيولوجي أو اختيار مواقع اختبار العينات الجيوكيميائية بدقة عالية، مما يساهم في تقليل النفقات وتوفير الجهد والموارد.

وتبرز أهمية هذا النموذج التحليلي في كونه لم يقتصر على مجرد دمج رقمي للبيانات المتاحة، بل استند إلى منهجية جيولوجية تكاملية راعت العلاقات المتبادلة بين طبيعة الصخور، وأنماط التحوير المعدني، ومستوى النشاط البنيوي، وهو ما أضفى مصداقية علمية عالية على النتائج المستخلصة. ومن هذا المنطلق، فإن نتائج هذا البحث تفتح آفاقاً واسعة لوضع استراتيجيات تنمية أكثر دقة وتخصصاً، يمكن لهيئة المساحة الجيولوجية والثروات المعدنية تبنيها في إطار جهودها لتحديث خارطة الثروات المعدنية في اليمن، وتعزيز كفاءة أعمال الاستكشاف المعدني وفق أسس علمية حديثة ومعتمدة.



خريطة رقم (8): توضح التناسب المكاني وربطها بالتحوير الطيفي والكثافة البنيوية ونتائج التحليل الجيوكيميائي

النتائج والمناقشة

نتائج التحليل الطيفي:

نتائج التحليل الطيفي والاستشعار عن بُعد كفاءة التمييز بين الوحدات الصخرية والمعادن عبر تقنيات الاستشعار عن بعد: نجحت الدراسة في التمييز بين مختلف أنواع الصخور والمعادن ضمن منطقة الدراسة باستخدام بيانات الأقمار الصناعية Landsat-8 وASTER، وخاصة في الكشف عن التغيرات الهيدروحرارية التي ترتبط عادةً بمواقع التمعدن. وقد أظهر التحليل الطيفي للبيانات فعالية كبيرة في التعرف على معادن الكربونات، الأكاسيد، والمعادن الطينية.

تفوق صور ASTER في التحليل الطيفي: أظهرت بيانات ASTER دقة طيفية عالية بفضل نطاقاتها في المجال القصير للأشعة تحت الحمراء (SWIR)، مما أتاح تمييزاً واضحاً بين معادن طينية مثل الكاولين والإليت، إضافة إلى معادن الحديد. في المقابل، قدمت Landsat-8 دقة مكانية أكبر، ما ساعد في رسم خرائط تركيبية وجيومورفولوجية دقيقة.

التحليل الطيفي المتكامل: ساهم دمج نتائج مؤشرات النطاقات الطيفية (Band Ratios) مع التركيبات اللونية الكاذبة (FCC) في تعزيز دقة النتائج المكانية، حيث أمكن تمييز نطاقات تمعدن محددة بناءً على نمط الانعكاسات الطيفية وتوزيعها المكاني.

رسم خرائط التحور الهيدروحراري: تم إنتاج خرائط للتحور الهيدروحراري بناءً على معالجة الصور الطيفية بعد تصحيحها إشعاعياً وجوياً، وقد كشفت هذه الخرائط عن أنماط واضحة من التحور تتطابق مع مواقع الشقوق البنيوية والعروق الكربوناتيّة، مما يعزز إمكانية اعتبارها مؤشرات استكشاف أولية.

نتائج التحليل الجيوكيميائي:

أجري تحليل كيميائي لسبع عينات صخرية باستخدام تقنية التحليل الفلوري بالأشعة السينية (XRF) في مختبرات الطاقة الذرية بالأردن. كشفت النتائج عن تراكيز مهمة لعدد من الأكاسيد والعناصر، مثل SiO_2 ، Fe_2O_3 ، TiO_2 ، و P_2O_5 .

مؤشرات على وجود معادن استراتيجية: أوضحت بعض العينات تواجداً لتركيزات مرتفعة من الحديد والفسفات، إلى جانب إشارات لوجود معادن نادرة مثل النيوبيت والمغنيتيت ضمن صخور الكربوناتيت، وهي معادن ذات أهمية اقتصادية في الصناعات الحديثة.

تطابق التحليل الجيوكيميائي مع النتائج الطيفية: ساهم دمج نتائج التحليل المعملّي مع التفسير الطيفي في تعزيز مصداقية النتائج، حيث تطابقت المواقع التي أظهرت انعكاسات طيفية معدنية مع العينات التي بيّنت تراكيز مرتفعة للعناصر المدروسة.

نتائج تحليل المسح الجيولوجي:

تم إنتاج خريطة شاملة للخطوط التركيبية اعتمادًا على بيانات DEM وصور الأقمار الصناعية، وباستخدام تحليل مخطط الوردة (Rose Diagram) تم تحديد الاتجاهات البارزة للفوالق والشقوق، وأظهرت الاتجاهات الغالبة NE-SW و NW-SE كثافة وتقاطعات الخطوط التركيبية: أظهرت خريطة الكثافة التركيبية أن مناطق التقاء وتداخل الفوالق تُعد من البيئات الجيولوجية المفضلة للمعدن، نتيجة لتوفر مسارات لتدفق السوائل المعدنية، وقد توافقت هذه المناطق مع نتائج التحليل الطيفي. تحليل مشترك للمؤشرات البنيوية والمعدنية: تم دمج نتائج التحليل البنيوي مع مؤشرات التحور الطيفي والنتائج الجيوكيميائية في بيئة نظم المعلومات الجغرافية GIS لإنتاج خريطة احتمالية للتعدن (Potential Map)، بينت تركيزًا محتملاً للمعادن في مناطق محددة.

توصيات الدراسة

استنادًا إلى نتائج هذه الدراسة، وتأكيدًا على أهمية تعزيز العمل الجيولوجي والاستكشافي في محافظة أربيل، تُقترح التوصيات التالية لدعم مراحل البحث والتطبيق العملي:

1. يوصى باستخدام تقنيات التحسس الطيفي فائق الدقة في الدراسات المستقبلية، لما توفره من تمييز طيفي عالي يسمح برصد أدق للمعادن والتحورات الهيدروحرارية. ويُعد إدخال هذه التقنية مرحلة متقدمة من مراحل الاستكشاف المعدني، خاصة في البيئات الجبلية المعقدة.
2. تُوصى الجهات المختصة بتنفيذ عمليات حفر ميدانية تجريبية في المواقع التي أظهرت توافقًا بين المؤشرات الطيفية والتحليل الجيوكيميائية، للتحقق من مدى امتداد التمددات في الأعماق وتحديد جودة الخام وتركيزه بدقة.
3. ينبغي العمل على تطوير قاعدة بيانات مكانية رقمية تحتوي على نتائج التحليل الطيفية، الجيوكيميائية، والبنيوية، وتكون مفتوحة الاستخدام للباحثين وصناع القرار. ويمكن لهذه القاعدة أن تكون نواة لنظام معلومات معدني وطني يساهم في تخطيط مشاريع التعدين والاستثمار المستقبلي.
4. في ضوء المؤشرات الواعدة التي أبرزتها الدراسة، يُنصح بإعداد خطط ترويجية لجذب المستثمرين في قطاع المعادن، وتقديم تسهيلات إجرائية وقانونية لاستقطاب الشركات المتخصصة، خصوصًا في مجال المعادن الاستراتيجية والنادرة، مما يعزز من اقتصاد المنطقة ويوفر فرص عمل مستدامة.
5. تُشدد الدراسة على أهمية دعم البحوث التطبيقية في مجال علوم الأرض، وضرورة ربط مخرجات هذه الدراسات ببرامج هيئة المساحة الجيولوجية والثروات المعدنية، وبالتنسيق مع جامعة عدن. ويُقترح توقيع مذكرات تفاهم بحثية وتدريبية بين الجهتين لتبادل الخبرات، وتدريب الكوادر، وتنفيذ دراسات مشتركة تركز على الاستكشاف المعدني في محافظات جنوب اليمن، مما يعزز من فاعلية البحث العلمي ويُساهم في تنمية الثروات الوطنية.

قائمة المراجع والمصادر

أولاً: المراجع في اللغة العربية:

- إدارة الثروة المعدنية في المنظمة العربية للتقريب والتعدين. (2020). دراسة المعادن الاستراتيجية في الدول العربية.
- الحربي، م.، وآخرون. (2008). دراسة جيولوجية باستخدام بيانات Landsat و ASTER في منطقة عرفات، مكة المكرمة، المملكة العربية السعودية. مجلة جامعة الملك سعود - العلوم، 20(3)، 115-128.
- الخرباش، ص.، الانبعاوي، م. ز.، الوصابي، م.،، خنبري، خ.، حبتور، ع. (2024). جيولوجية اليمن (الطبعة الثانية).
- الهاشمي، ع.، وآخرون. (2020). استخدام نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد لتحديد مناطق المياه الجوفية في حوض نهر خازر، شمال العراق. مجلة دراسات العراق للعلوم البيئية والمائية، 9(2)، 101-112.
- العامري، س.، وآخرون. (2021). تحليل بنيوي طيفي باستخدام Sentinel-2 في منطقة وادي الكبير، سلطنة عمان. المجلة العمانية للعلوم الجيولوجية، 12(1)، 88-99.
- عبد الله، ع.، وآخرون. (2012). تطبيق تقنيات الاستشعار عن بعد لتحليل التراكيب الخطية في منطقة العبيدية - شمال السودان. مجلة أبحاث الأراضي والبيئة السودانية، 17(1)، 45-60.
- عقلان، ت. ع. (2023). تغيرات الغطاء الأرضي في حوض وادي بنا وانعكاساتها البيئية باستخدام الجيوماتكس [رسالة دكتوراه غير منشورة]. جامعة عدن، كلية الآداب.

ثانياً: المراجع في اللغة الأجنبية:

- Abdul-Qadir, A., & Al-Jaf, A. (2009). Digital processing of Landsat images to detect iron and kaolin deposits in western Iraq. *Iraqi Journal of Science*, 50(4), 519-532.
- Agar, B., & Coulter, D. (2007). Remote sensing for mineral exploration - A decade perspective 1997-2007. *Exploration* 07, 109-136.
- Al-Dharab, M., et al. (2018). Analysis of tectonic lineaments in Shabwa, Yemen. *Yemeni Geological Bulletin*, 27, 73-84.
- Aldharab, H. S., et al. (2018). GIS and hypsometry of sub-basins in Ataq, Yemen. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, 6, 3489-3497.
- Al-Gurairy, A. S. Y., & Al-Edami, R. R. (2023). Survey of mineral/clay deposits in Al-Qadisiyah, Iraq (Geographical study using Landsat & Sentinel-2).
- Al-Nahmi, A. M., et al. (2015). Structural lineament mapping in Al-Mahabishah, Yemen. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(6), 3451-3463.

-
- Al-Qallaf, F. M. (2018). Geologic mapping in Wadi Al-Batin using remote sensing [Doctoral dissertation, Kuwait University].
 - Ali, S., Al-Ariqi, M., & Al-Kadasi, M. (2009). Spectral calibration of ASTER and ETM+ in NE Hajjah, Yemen. *Yemeni Journal of Earth Sciences*, 22(2), 45–58.
 - Anastasiou, A., et al. (2019). Mapping hydrothermal alteration using unmixing in Nisyros, Greece. *Remote Sensing*, 11(24), 4180.
 - Beydoun, Z. R. (1964). Title of the book. Publisher.
 - Beydoun, Z. R. (1992). Geology and hydrocarbon resource potential of the Gulf of Aden and southern Red Sea. *Journal of Petroleum Geology*, 15(1), 61–80.
 - Bonham-Carter, G. F. (1994). *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*. Elsevier.
 - Elsaid, M., et al. (2014). ASTER processing for mapping alteration zones in Egypt. *The Open Geology Journal*, 8(1).
 - European Research Group. (2024). Hydrothermal mapping using ASTER & Landsat-9 in France. *Journal of Applied Geophysics*, 215, 104677.
 - Faraj, K., et al. (2019). ASTER and VLF-EM integration in Wadi Albana, Yemen. *Geoscience Frontiers*, 10(5), 1777–1788.
 - Fatima, K., et al. (2017). Mineral identification with ASTER. *Journal of Applied Remote Sensing*, 11(4), 046006.
 - Fox, A. B., Smith, C. D., & Brown, E. F. (1977). Title of the book. Publisher.
 - Ghareb, S. A., et al. (2022). Jurassic microfossils in Jabal Al-Balaq, Yemen. *Bulletin of Pure & Applied Sciences – Geology*, 41(2), 228–250.
 - Ghareb, S. A., et al. (2024). Structural features in Marib, Yemen. *Bulletin of Pure & Applied Sciences – Geology*, 65–79.
 - Ghorbanian, A., et al. (2020). Mapping volcanic/sedimentary units in Morocco. *Sustainability*, 14(22), 15349.
 - Greenwood, N. N., & Bleackley, M. (1967). Title of the book. Publisher.
 - Horsfall, O. I., et al. (2015). Hydrocarbon reservoir characterization in Nigeria. *IJANS*, 4(5), 55–64.
 - Imbroane, M. A., et al. (2007). Mineral explorations by Landsat image ratios. In *IEEE SYNASC* (pp. 335–340).
 - Isakin, V. A., & Degtyariv, A. V. (1990). Geological investigations of the Aden region. Geological Survey (formerly Aden PDRY).
 - Khanbari, H. A., et al. (2016). Lithological mapping using Sentinel-2 in Hajjah, Yemen. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 4, 12–20.
 - Lobunets, S. S. (1990). Geological studies of the Aden region. ZM, Aden.
-

- Lobunets, S. S. (Ed.), & Zabrodin, V. E. (Comp.). (1990). Geological studies of the Aden region. Geological Survey (formerly Aden PDRY).
- Manuel, R., et al. (2017). Remote sensing for mineral exploration in Portugal. *Minerals*, 7(10), 184.
- Mars, J. C., & Rowan, L. C. (2006). Regional mapping of phyllic- and argillic-altered rocks in the Zagros Magmatic Arc, Iran, using ASTER data. *Remote Sensing of Environment*, 99(1–2), 14–27.
- Mirmazloumi, S. M., et al. (2022). ELULC-10 land cover map using GEE. *Remote Sensing*, 14(13), 3041.
- Mohammed, A., Palanivel, K., & Ramasamy, S. M. (2010). Significance of surface lineaments in Sabatayn Basin, Yemen. *Journal of Geography and Geology*, 5(1), 19–32.
- Mohammed, A., Palanivel, K., & Ramasamy, S. M. (2011). Hyperspectral remote sensing in degasification zones, Yemen. *International Journal of Petroleum Science and Technology*, 2(1), 119–128.
- Mohammed, A., & Alshayef, M. (2017). GIS WLC model for hydrocarbons in Yemen. *SSRG International Journal of Geo-Informatics and Geological Science*, 4(4), 1–5.
- O’Leary, D. W., et al. (1976). Title of the book. Publisher.
- Oikonomidis, D., et al. (2009). Geological mapping using multispectral and multitemporal images. *Remote Sensing*, 14(14), 3456.
- Pour, A. B., & Hashim, M. (2012). The application of ASTER remote sensing data to lithological mapping and mineral exploration in tropical environments. *Journal of Asian Earth Sciences*, 44, 1–17.
- Rowan, L. C., Hook, S. J., & Abrams, M. J. (2003). Mapping hydrothermally altered rocks with ASTER data in northern Death Valley, USA. *Remote Sensing of Environment*, 84(3), 350–366.
- Sekandari, M., et al. (2020). Mineral exploration using Landsat 8 OLI data. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 19, 100–110.
- Siddig, H. (2024). Remote sensing & GIS for land degradation in Sudan [Doctoral dissertation, University of Khartoum].

ثالثاً: المواقع الإلكترونية:

- Copernicus. (n.d.). Land Monitoring Service. <https://land.copernicus.eu/>
- Earth Observing System (EOS). (n.d.). LandViewer Platform. <https://eos.com/landviewer/>
- European Space Agency (ESA). (n.d.). Sentinel Online. <https://sentinels.copernicus.eu/>
- Group on Earth Observations (GEO). (n.d.). Earth Observation Data. <https://earthobservations.org/>
- Geospatial World. (n.d.). Remote Sensing Articles. <https://www.geospatialworld.net/category/articles/remote-sensing/>

-
- Google Earth Engine. (n.d.). Datasets and Tools. <https://earthengine.google.com/>
 - MDPI. (n.d.). Remote Sensing Journal. <https://www.mdpi.com/journal/remotesensing>
 - NASA Earth Observatory. (n.d.). Satellite Imagery and Analysis. <https://earthobservatory.nasa.gov/>
 - NASA Earthdata. (n.d.). ASTER Instrument Toolkit. <https://earthdata.nasa.gov/learn/toolkits/aster>
 - NASA LP DAAC. (n.d.). ASTER Global Digital Elevation Model (GDEM). <https://lpdaac.usgs.gov/products/astgtmv003/>
 - Meteoblue AG. (2025). Climate and Weather Historical Data. <https://www.meteoblue.com/>
 - National Center for Remote Sensing (CNRS–Lebanon). (n.d.). Remote Sensing and Geospatial Data. <http://www.cnrs.edu.lb/>
 - National Remote Sensing Centre (NRSC–ISRO). (n.d.). Remote Sensing Data and Applications. <https://www.nrsc.gov.in/>
 - NASA. (2024). ASTER Global Digital Elevation Model (GDEM). <https://asterweb.jpl.nasa.gov/>
 - OpenAerialMap. (n.d.). Free Aerial Imagery. <https://openaerialmap.org/>
 - OpenTopography. (n.d.). Free Access to Elevation Data. <https://opentopography.org/>
 - ResearchGate. (n.d.). Arabian Plate Sequence Stratigraphy. https://www.researchgate.net/publication/279778628_Arabian_Plate_Sequence_Stratigraphy
 - SAS Planet. (2025). Satellite Imagery and Geospatial Data Viewer. <https://www.sasgis.org/>
 - ScienceDirect. (n.d.). Remote Sensing of Environment Journal. <https://www.sciencedirect.com/journal/remote-sensing-of-environment>
 - The Geological Society. (n.d.). Geoscience Articles and Resources. <https://www.geolsoc.org.uk/>
 - USGS EarthExplorer. (n.d.). Satellite Imagery Access. <https://earthexplorer.usgs.gov/>
 - USGS – United States Geological Survey. (2024). EarthExplorer: Landsat Satellite Data. <https://earthexplorer.usgs.gov/>
 - USGS – United States Geological Survey. (n.d.). Landsat 8 Overview. <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8>
 - United Nations Environment Programme (UNEP). (n.d.). Global Environmental Data and Resources. <https://www.unep.org/resources>