

تحليل التغير المكاني-الزمني لاضطراب سطح الأرض وتدهور التربة في محجر خام الحديد ومحيطه بالجموم باستخدام الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية

نواف عبدالرحمن نادر

باحث دكتوراة، الدراسات البيئية (جغرافيا)، كلية اللغات والعلوم الإنسانية، جامعة القصيم، المملكة العربية السعودية
nawaf.a.nader@gmail.com

أحمد محمد البسام

أستاذ دكتور، الجغرافيا، كلية اللغات والعلوم الإنسانية، جامعة القصيم، المملكة العربية السعودية
absam@qu.edu.sa

ملخص البحث

هدفت الدراسة إلى تحليل التغير المكاني-الزمني لاضطراب سطح الأرض وتدهور التربة في محجر خام الحديد ومحيطه بمحافظة الجموم خلال الفترة 2015-2025، بالاعتماد على بيانات Landsat Collection 2 Level-2 وتقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية. استخدمت الدراسة مؤشري الاضطراب السطحي (DI) وانكشاف التربة (BSI) لاستخلاص مؤشرات كمية قابلة للمقارنة، مع توحيد النطاق المكاني للتحليل داخل حدود المحجر ونطاق محيط بمسافة 3 كيلومترات. أظهرت النتائج استمرار الاضطراب السطحي داخل النواة التعدينية، وارتفاع القيم القصوى لمؤشر DI من 1.385 عام 2015 إلى 1.481 عام 2025، مقابل انخفاض المتوسط العام من 0.872 إلى 0.812، بما يعكس تركيز الاضطراب في النواة واستقراراً نسبياً في المحيط. كما كشفت نتائج BSI عن استمرار انكشاف التربة وامتداد بعض مناطق الانكشاف الشديد خارج حدود المحجر، لا سيما في الاتجاه الجنوبي. وتؤكد الدراسة أهمية توظيف التحليل المكاني-الزمني متعدد المؤشرات في رصد مواقع التعدين بالبيئات الجافة، وتدعم توسيع نطاق تقييم الأثر البيئي خارج حدود الترخيص الرسمي.

الكلمات المفتاحية: اضطراب سطح الأرض؛ تدهور التربة؛ محاجر خام الحديد؛ مؤشر DI؛ مؤشر BSI؛ الاستشعار عن بعد؛ نظم المعلومات الجغرافية.

Spatio-Temporal Analysis of Land Surface Disturbance and Soil Degradation in and around the Iron Ore Quarry in Al-Jumum Using Remote Sensing and GIS

Nawaf Abdulrhman Nader

PhD Researcher, Environmental Studies (Geography), College of Languages and Humanities,
Qassim University, Saudi Arabia
nawaf.a.nader@gmail.com

Ahmed Mohammed Al-Bassam

Professor of Geography, College of Languages and Humanities, Qassim University, Saudi Arabia
nawaf.a.nader@gmail.com

Abstract

This study analyzes the spatio-temporal change in land surface disturbance and soil degradation in and around the iron ore quarry in Al-Jumum Governorate during 2015–2025 using Landsat Collection 2 Level-2 data, remote sensing, and geographic information systems. The Disturbance Index (DI) and Bare Soil Index (BSI) were used to derive comparable quantitative indicators within the quarry boundary and a 3 km surrounding buffer. The results indicate persistent surface disturbance within the mining core, where the maximum DI increased from 1.385 in 2015 to 1.481 in 2025, while the mean value declined from 0.872 to 0.812, reflecting intensified disturbance in the core and relative stability in the surrounding area. BSI results also reveal continued soil exposure and the extension of high-exposure zones beyond the official quarry boundary, particularly toward the south. The study demonstrates the value of multi-index spatio-temporal analysis for monitoring mining sites in arid environments and supports expanding environmental impact assessment beyond official license boundaries.

Keywords: Land Surface Disturbance, Soil Degradation, Iron Ore Quarry, Disturbance Index, Bare Soil Index, Remote Sensing, GIS.

المقدمة

يُعدّ التعدين من أكثر الأنشطة البشرية إحدائاً لاضطراب سطح الأرض، لما يرتبط به من حفر وإزالة للغطاء السطحي وتكديس للمخلفات وشق للمسارات، وهي عمليات تُحدث تغييراً جذرياً في البنية المورفولوجية للسطح. ولا يقتصر أثره على التغير الشكلي، بل يمتد إلى تدهور خصائص التربة وزيادة قابليتها للتعرية، إضافة إلى تغير الخصائص الحرارية والانعكاسية لسطح الأرض نتيجة انكشاف المواد الصخرية وتراكم المخلفات. لذلك يُنظر إلى الصناعة الاستخراجية كأحد المحركات المباشرة لتدهور الأراضي، خاصة في البيئات الهشة التي تتسم ببطء التعافي وضعف القدرة على الاستعادة الطبيعية.

وفي هذا الإطار، تُقدّم البرازيل مثلاً عالمياً واضحاً على أهمية الرصد المكاني-الزماني للاضطرابات السطحية عبر بيانات الأقمار الصناعية؛ إذ شهد إقليم الأمازون ضغوطاً متزايدة بفعل أنشطة بشرية متنوعة، وتُظهر الأدبيات العلمية استخدام صور Landsat وتقنيات التحليل المكاني لرصد "اضطرابات الغطاء/السطح" وتتبعها عبر الزمن على نطاقات مكانية واسعة، بما يعكس قابلية الاستشعار عن بعد لتتبع البصمات المكانية للاضطراب بدقة وموضوعية. (Tyukavina et al., 2017).

وعلى المستوى الإقليمي، تزداد حساسية البيانات الجافة وشبه الجافة كبيئات الشرق الأوسط وشبه الجزيرة العربية لأي اضطراب سطحي؛ إذ إن محدودية الغطاء النباتي وضعف قدرة النظم الطبيعية على التعافي السريع، إضافة إلى تأثيرات الجفاف والرياح، تجعل آثار الاضطراب أكثر بقاءً وأوسع امتداداً مكانياً. وتؤكد أدبيات تقييم تدهور الأراضي في البيئات الجافة ضمن إطار منظمة الأغذية والزراعة للأمم المتحدة أن تدهور التربة والغطاء الأرضي في هذه البيئات يرتبط بتفاعل العوامل المناخية مع الضغوط البشرية، ما يجعل الرصد المبكر والتتبع الزمني للتغيرات السطحية أمراً حاسماً لفهم مسارات التدهور (Biancalani et al., 2013).

أما على المستوى الوطني والمحلي، ومع تنامي الاهتمام بتطوير قطاع التعدين في المملكة ضمن مستهدفات التحول الاقتصادي، تتعاظم الحاجة إلى أدوات علمية قابلة للتطبيق لرصد آثار التعدين بيئياً، بما ينسجم مع توجهات تطوير القطاع وربط نموه باعتبارات الاستدامة. وتبرز في هذا السياق أهمية تحويل البيانات الفضائية إلى مؤشرات كمية وخرائط زمنية تساهم في تقدير حجم الاضطراب واتجاهاته ومدى امتداد تأثيره خارج حدود المواقع التعدينية، بما يتيح توصيف البصمة المكانية للاضطراب وتحليل أنماط انتشارها عبر الزمن.

وانطلاقاً من محدودية التقدير الكمي الدقيق للتغيرات السطحية عبر الزمن، تسعى الدراسة إلى تحليل التغير المكاني-الزماني للاضطراب سطح الأرض باستخدام تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية، بما يوفر أساساً علمياً موضوعياً يدعم الإدارة البيئية ويحسن كفاءة برامج الحد من التدهور وإعادة التأهيل.

مشكلة الدراسة

تبرز مشكلة الدراسة في صعوبة التقدير الكمي الدقيق لحجم الاضطراب السطحي الناتج عن أنشطة التعدين ومدى امتداده خارج حدود الموقع، خاصة في البيئات الجافة التي تتسم بحساسية عالية للتغيرات السطحية وضعف في القدرة الطبيعية على التعافي. فمع توسع الأنشطة التعدينية، لا تزال المعلومات المتاحة في كثير من الحالات وصفية أو أنية، ولا تستند إلى تحليل زمني متكامل يكشف تطور الاضطراب عبر فترات زمنية متعاقبة، كما أنها لا تعكس شدته المكانية بصورة قابلة للقياس والمقارنة. ويترتب على ذلك صعوبة في تحديد المستوى الفعلي لتدهور التربة، والتمييز بين التغيرات الطبيعية والتغيرات الناتجة عن النشاط التعديني، إضافة إلى ضعف القدرة على تقييم فعالية إجراءات إعادة التأهيل أو مقارنة أوضاع الموقع بين فترات زمنية مختلفة. ومن هنا تظهر الحاجة إلى اعتماد منهجية تحليل مكاني-زمني قائمة على بيانات فضائية متعددة التواريخ، لاستخلاص مؤشرات كمية دقيقة تمكن من رصد التغير وتحديد اتجاهاته وشدته بصورة موضوعية تدعم الإدارة البيئية المستندة إلى الأدلة.

أهداف الدراسة

تهدف الدراسة إلى الآتي:

1. تحليل التغير المكاني-الزماني للاضطراب سطح الأرض في موقع التعدين ومحيطه باستخدام تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية.
2. تحديد حجم وشدة التدهور السطحي ومدى امتداد تأثيره مكانياً من خلال استخراج مؤشرات كمية قابلة للقياس والمقارنة.
3. تقييم فاعلية توظيف تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية في رصد اضطرابات سطح الأرض في البيئات الجافة.

أسئلة الدراسة

ما مقدار التغير المكاني-الزماني في اضطراب سطح الأرض داخل محجر خام الحديد ومحيطه خلال الفترة 2015-2025؟
إلى أي مدى يمتد تأثير النشاط التعديني خارج حدود المحجر الرسمية ضمن نطاق التحليل المكاني المحيط؟
ما مدى قدرة مؤشري الاضطراب السطحي (DI) وانكشاف التربة (BSI) على تمثيل مظاهر التدهور السطحي في بيئة جافة؟

أهمية الدراسة

تكتسب هذه الدراسة أهميتها من تقاطع عدة محاور علمية وتطبيقية:

- الأهمية العلمية والمنهجية تُسهم الدراسة في تعزيز المنهجية الكمية لرصد اضطرابات سطح الأرض في البيئات الجافة، من خلال توظيف تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية بأسلوب زمني مقارن، مما يُثري قاعدة المعرفة العلمية في مجال الرصد البيئي للبيئات التعديني التي تظل أقل تناولاً في الأدبيات الإقليمية.
- الأهمية الجغرافية والبيئية تُقدّم الدراسة نموذجاً تطبيقياً لمحجر خام الحديد في محافظة الجموم غرب المملكة العربية السعودية، في سياق بيئي جاف بالغ الهشاشة، مما يجعلها إضافة نوعية لفهم ديناميكية التغير البيئي في المناطق الجافة بالمملكة.
- الأهمية التطبيقية وصنع القرار توفر الدراسة مؤشرات ومخرجات خرائطية كمية يمكن توظيفها مباشرة في دعم قرارات الإدارة البيئية، وتوجيه برامج إعادة التأهيل، ورسم حدود نطاق التأثير خارج الموقع التعديني، مما يُقلص الفجوة بين البحث الأكاديمي والتطبيق الميداني.
- الأهمية التنظيمية والتخطيطية تتسق الدراسة مع متطلبات الاشتراطات البيئية السعودية والدولية المتعلقة برصد المواقع التعدينية وتقييم أثرها، وتوفر أداةً منهجية قابلة للتوسع والتطبيق على مواقع مماثلة في المنطقة.
- الانسجام مع رؤية المملكة 2030 تتسجم الدراسة مع مستهدفات الرؤية في تطوير قطاع التعديني ضمن إطار بيئي مستدام، إذ توفر أدوات رصد دقيقة تُعزز المساءلة البيئية وتُحقق التوازن بين الاستثمار في الموارد الطبيعية وصون المنظومة البيئية.

منطقة الدراسة

تقع منطقة الدراسة في محجر خام الحديد ومحيطه بمحافظة الجموم غرب المملكة العربية السعودية، ضمن النطاق الإداري لمنطقة مكة المكرمة، وتُعد من البيئات الجافة التي تتسم بحساسية عالية تجاه التغيرات السطحية الناتجة عن الأنشطة البشرية، وبخاصة التعديني.

تقع منطقة المحجر تقريباً بين دائرتي عرض (21.670° - 21.681° شمالاً) وخطي طول (39.507° - 39.523° شرقاً)، وقد تم تحديد حدود المحجر اعتماداً على البيانات المكانية الرقمية باستخدام تقنيات نظم المعلومات الجغرافية، كما تم إنشاء نطاق مكاني محيط (Buffer) بمسافة 3 كيلومترات لدراسة امتداد التأثيرات البيئية خارج حدود الموقع التعديني.

وتبلغ المساحة الفعلية للمحجر وفق البيانات الميدانية واللوحه الإرشادية نحو 0.826 كيلومتر مربع، في حين أظهر التحديد المكاني المعتمد على البيانات الفضائية امتداداً أكبر يصل إلى نحو 1.8 كيلومتر مربع، ويعزى هذا الفرق إلى أن التحليل الفضائي يشمل نطاق التأثير الفعلي للنشاط التعديني والمناطق المتأثرة المحيطة بالمحجر، وليس فقط حدود الترخيص الرسمية.

وتتميز المنطقة بمناخ صحراوي حار، حيث ترتفع درجات الحرارة صيفاً لتتجاوز 40 درجة مئوية، وتنخفض شتاءً إلى نحو 18-22 درجة مئوية، في حين تتسم الأمطار بندرتها وعدم انتظامها، إذ يبلغ متوسط الهطول السنوي نحو 50-60 ملم، وقد يصل إلى قيم أعلى في بعض السنوات، وذلك استناداً إلى الدراسات المناخية المنشورة عن مناخ مدينة جدة والمناطق المجاورة (Abdullah, 2019).

أما من الناحية الجيومورفولوجية، فقتسم المنطقة بسطح شبه مستوٍ إلى متموج، مع انتشار التكوينات الصخرية والرواسب السطحية، حيث تسود التربة الرملية إلى الرملية الطميية ذات القوام الخشن في البيئات الجافة، وهو ما يجعلها أكثر عرضة للتأثر بعمليات الحفر والتجريف وإزالة الغطاء السطحي الناتجة عن النشاط التعديني.



شكل (1): خريطة موقع منطقة الدراسة توضح حدود محجر خام الحديد بمحافظة الجموم باستخدام البيانات المكانية، مع إظهار موقعه بالنسبة لمنطقة مكة المكرمة والمملكة العربية السعودية.

منهجية الدراسة

تعتمد الدراسة على منهجية متكاملة تجمع بين المنهج الوصفي، والتحليلي، والمكاني-الزمني، وذلك على النحو الآتي:

1. المنهج الوصفي:

استُخدم المنهج الوصفي في: توصيف خصائص منطقة الدراسة (البيئة الجافة)، ووصف طبيعة النشاط التعديني، وتفسير الظواهر البيئية المرتبطة باضطراب سطح الأرض.

2. المنهج التحليلي:

تم توظيف المنهج التحليلي في: معالجة الصور الفضائية، واستخراج المؤشرات الطيفية، تحليل شدة التغير في سطح الأرض، وتفسير العلاقة بين النشاط التعديني والتدهور البيئي.

3. المنهج المكاني-الزمني:

يُعد المنهج المكاني-الزمني الإطار الأساسي للدراسة، حيث تم: تحليل التغيرات خلال الفترة الزمنية (2015 – 2025)، ومقارنة البيانات متعددة التواريخ، وتتبع تطور اضطراب سطح الأرض، وتحديد امتداد التأثير خارج حدود المحجر.

اعتمدت الدراسة على بيانات Landsat Collection 2 Level-2 المصححة إشعاعياً وجوياً، وتم تطبيق معاملات التحويل القياسية للقيم الانعكاسية السطحية وفق الصيغة: $Reflectance = DN \times 0.0000275 - 0.2$. ثم أزيلت السحب وظلالها بالاعتماد على حزمة الجودة QA_PIXEL، وبعد ذلك أنشئ مركب موسمي بالوسيط الحسابي (Median Composite) للفترة من مارس إلى مايو لكل سنة، بهدف تقليل تأثير الغيوم والاختلافات الموسمية وتحقيق قابلية المقارنة بين سنوات الدراسة.

ولتعزيز الاتساق المنهجي، اقتصر التحليل المقارن على ثلاث نقاط زمنية ممثلة هي 2015 و2020 و2025، بحيث تمثل بداية الفترة ووسطها ونهايتها. وينتج هذا التصميم رصد اتجاه التغير العام خلال عشر سنوات، مع الإقرار بأن التحليل السنوي الكامل قد يقدم تفصيلاً زمنياً أدق في الدراسات اللاحقة.

كما تم توحيد حدود منطقة الدراسة مكانياً قبل إجراء التحليل، بحيث شملت حدود المحجر ونطاقاً محيطاً بمسافة 3 كيلومترات، ثم أُجريت جميع عمليات القص المكاني وحساب الإحصاءات داخل هذا النطاق لضمان المقارنة بين السنوات على أساس مكاني واحد. واعتمد تفسير النتائج على الدمج بين القيم الإحصائية للمؤشرات، والخرائط المكانية، والمشاهدات الميدانية؛ وذلك لتقليل الاعتماد على مؤشر واحد أو قيمة إحصائية منفردة، وللتمييز بين التغير البنوي المرتبط بالنشاط التعديني والتغيرات الطيفية المؤقتة المرتبطة بالعوامل الموسمية.

جودة البيانات والتحقق من النتائج

تم التعامل مع نتائج المؤشرات بوصفها مؤشرات طيفية للتدهور السطحي وليست قياساً مباشراً لكل خصائص التربة الفيزيائية والكيميائية، ولذلك جرى دعم تفسيرها بالمشاهدات الميدانية والقراءة المكانية للخرائط.

رُوعيت قابلية المقارنة بين السنوات من خلال توحيد فترة التحليل الموسمية، ونطاق القص المكاني، ومصدر البيانات الفضائية، ومعاملات التحويل، وإجراءات حجب السحب والظلال.

استُخدم التحقق الميداني للتحقق التفسيري من المواضيع ذات القيم المرتفعة في مؤشري DI وBSI، مع ربطها بمظاهر الحفر، والردميات، وانكشاف التربة، وطرق التشغيل داخل الموقع.

المؤشرات الطيفية المستخدمة

اعتمدت الدراسة على مجموعة من المؤشرات الطيفية لاستخلاص الخصائص البيئية المرتبطة باضطراب سطح الأرض وتدهور التربة، وذلك على النحو الآتي:

1. مؤشر الاضطراب (DI):

باعتباره ملائماً لرصد الاضطراب السطحي في مناطق التعدين، تم استخدام مؤشر DI لقياس شدة اضطراب سطح الأرض وفق العلاقة المبنية على تحويل $Tasseled\ Cap: DI = Brightness - (Greenness + Wetness)$. ويعكس ارتفاع قيمة المؤشر زيادة السطوع وانخفاض الرطوبة والاحضرار، وهي خصائص ترتبط غالباً بانكشاف السطح والحفر والردميات في البيئات التعدينية.

حيث تمثل Brightness درجة سطوع السطح، وتمثل Greenness الاستجابة المرتبطة بالغطاء النباتي، وتمثل Wetness الرطوبة السطحية. وقد استُخدمت معاملات Tasseled Cap المناسبة لبيانات Landsat 8/9 بالاستناد إلى الأدبيات المتخصصة في اشتقاق هذا التحويل من بيانات Landsat.

$$DI=TCB-(TCG+TCW)$$

2. مؤشر انكشاف التربة (BSI):

يعد مؤشر BSI مناسباً للبيئات الجافة، حيث يعكس التغيرات المرتبطة بإزالة الغطاء السطحي وزيادة تعرض التربة للعوامل البيئية. وتم استخدام مؤشر BSI لرصد التربة المكشوفة والمناطق المتدهورة وفق المعادلة: $BSI = ((SWIR1 + Red) - (NIR + Blue)) / ((SWIR1 + Red) + (NIR + Blue))$. وتشير القيم الأعلى إلى زيادة انكشاف التربة والمواد السطحية الجافة، في حين تشير القيم الأقل إلى انخفاض درجة الانكشاف النسبي أو تغير الاستجابة الطيفية بفعل الرطوبة أو الغطاء السطحي.

ولأغراض التفسير المكاني، لم يتم الاعتماد على قيمة مفردة فقط للحكم على التدهور، بل جرى تفسير المؤشرات من خلال الجمع بين المتوسطات، والحدود القصوى والذنيا، والانحراف المعياري، والخرائط، والمشاهدات الميدانية. كما عُدَّت القيم المرتفعة محلياً في BSI وDI مؤشراً على مناطق حرجة تتطلب تحقّقاً ميدانياً أو بصرياً إضافياً.

$$BSI = [(SWIR + Red) - (NIR + Blue)] \div [(SWIR + Red) + (NIR + Blue)]$$

الدراسات السابقة

الدراسات العربية:

هدفت دراسة محمد (2012) إلى تحليل تدهور التربة وتملحها في منطقة السلمية بسورية من خلال دمج بيانات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية، حيث اعتمدت على الصور الفضائية متعددة التواريخ لإنتاج خرائط دقيقة توضح درجات التدهور وتوزيعها المكاني. وأظهرت نتائج الدراسة قدرة هذه التقنيات على الكشف عن مناطق الانكشاف والتدهور بدقة، إضافة إلى تحديد شدة التغيرات البيئية، مما يؤكد أهمية التحليل الطيفي في دراسة خصائص سطح الأرض.

وعلى الرغم من أهمية هذه الدراسة في إبراز دور تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية في تحليل التدهور البيئي، إلا أنها ركزت في الغالب على تحليل تدهور التربة أو الغطاء الأرضي بصورة عامة، دون التعمق في تحليل اضطراب سطح الأرض الناتج عن الأنشطة التعدينية، أو الربط بين التحليل المكاني-الزمني والمؤشرات الطيفية المتخصصة، وهو ما تسعى الدراسة الحالية إلى معالجته.

الدراسات غير العربية:

ناقشت دراسة أودونيل وآخرون (O'Donnell et al., 2024) بعنوان "استخدام الاستشعار عن بعد في مراقبة أراضي التعدين وجهود الاستعادة البيئية" تحليل التغيرات في الغطاء النباتي والارتفاعات باستخدام بيانات زمنية من Landsat، بهدف تقييم تأثير التعدين وإعادة التأهيل البيئي. وأظهرت النتائج أن المؤشرات الطيفية قادرة على رصد التغيرات طويلة المدى في المناطق المتأثرة بالتعدين. وترتبط هذه الدراسة بموضوع البحث الحالي في توظيف البيانات الزمنية لرصد التغيرات البيئية.

عالجت دراسة يانغ وآخرون (Yang et al., 2018) بعنوان "تحليل ديناميكيات اضطراب الغطاء النباتي في مناطق التعدين باستخدام بيانات Landsat" استخدام السلاسل الزمنية للصور الفضائية بهدف تتبع التغيرات البيئية في مناطق التعدين. وأظهرت النتائج أن التحليل الزمني يُمكن من الكشف عن التغيرات التدريجية والمفاجئة في الغطاء النباتي بدقة عالية. وترتبط هذه الدراسة بموضوع البحث الحالي في دعم التحليل الزمني لاضطراب سطح الأرض.

حللت دراسة شياو وآخرون (Xiao et al., 2020) بعنوان "رسم خرائط اضطراب سطح الأرض في مناطق التعدين باستخدام بيانات Landsat الزمنية" تحليل التغيرات المكانية-الزمنية لسطح الأرض بهدف تحديد نطاق تأثير التعدين. وأظهرت النتائج فعالية التحليل الزمني في تحديد الامتداد المكاني للاضطراب بدقة عالية. وترتبط هذه الدراسة بموضوع البحث الحالي في تحليل امتداد التأثير خارج حدود الموقع التعديني.

تتبع دراسة هان وآخرون (Han et al., 2021) بعنوان "رصد تدهور الغطاء النباتي وتعافيه في مناطق التعدين ببيكين باستخدام سلاسل Landsat الزمنية" ديناميكيات التدهور والتعافي في مواقع تعدينية متعددة. وأظهرت النتائج قدرة التحليل الزمني على تصنيف المناطق بين التدهور المستمر والتعافي التدريجي بدقة عالية، مما يدعم توجيه قرارات إعادة التأهيل. وترتبط هذه الدراسة بموضوع

البحث الحالي في إثبات أن التحليل الزمني يكشف تباينات مكانية دقيقة في أنماط التدهور لا تظهر في التحليل الآني، وهو ما تؤكدته نتائج مؤشر DI في نواة محجر الجموم.

ناقشت دراسة شو وآخرون (Xu et al., 2025) بعنوان "تحليل الاتجاهات المكانية-الزمنية للتغيرات النباتية باستخدام تقنيات التحليل الزمني" استخدام نماذج تحليل السلاسل الزمنية مثل LandTrendr و CCDC بهدف فهم تغيرات الغطاء النباتي. وأظهرت النتائج أن هذه النماذج فعالة في تحديد توقيت وشدة التغيرات البيئية. وترتبط هذه الدراسة بموضوع البحث الحالي في دعم استخدام التحليل الزمني المتقدم.

طوّرت في دراسة هي وآخرون (He et al., 2024) بعنوان "مؤشر قائم على الاستشعار عن بعد لتقييم التأثيرات البيئية طويلة المدى في مناطق التعدين الجافة" مؤشراً مركباً لرصد جودة البيئة في مواقع التعدين الجافة. وأظهرت النتائج أن مؤشر انكشاف التربة يُسهم بنسبة تفسيرية مرتفعة في تقييم التدهور البيئي، وأن تحليله عبر الزمن يُمكن من رصد تراكم التأثيرات البيئية. وترتبط هذه الدراسة بموضوع البحث الحالي في دعم توظيف مؤشر BSI كأداة رئيسية لرصد انكشاف التربة في البيئات الجافة، مما يُعزز المبرر المنهجي لاختياره في هذه الدراسة.

الفجوة البحثية

على الرغم من تنامي الاهتمام العلمي بدراسة تأثير الأنشطة البشرية، وبخاصة التعدين، على البيئات الجافة باستخدام تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية، إلا أن مراجعة الأدبيات العربية والدولية تكشف عن عدد من القصور المنهجية والتطبيقية التي لا تزال قائمة.

أظهرت الدراسات تقدماً ملحوظاً في توظيف التحليل الزمني المعتمد على السلاسل الزمنية للبيانات الفضائية، كما في دراسة (Yang et al., 2018)، والتي ركزت على تتبع ديناميكيات اضطراب الغطاء النباتي واستعادته في مناطق التعدين باستخدام مؤشرات طيفية وخواصيات متقدمة. إلا أن هذه الدراسات انصبّت في الغالب على بيئات جغرافية تختلف في خصائصها المناخية والبيئية عن البيئات الجافة في المملكة العربية السعودية، كما ركزت بدرجة أكبر على الغطاء النباتي دون التوسع في تحليل انكشاف التربة واضطراب السطح بشكل مباشر.

ومن ناحية أخرى، يلاحظ أن عدداً محدوداً من الدراسات تناول امتداد التأثيرات البيئية خارج حدود المواقع التعدينية بصورة كمية ومكانية دقيقة، رغم أهمية هذا البعد في تقييم الأثر البيئي الشامل. كما أن الربط المتكامل بين التحليل الزمني والمكاني، وبين المؤشرات الطيفية المختلفة ذات العلاقة المباشرة باضطراب سطح الأرض، لا يزال محدوداً في الدراسات التطبيقية ضمن السياق المحلي.

وبناءً على ما سبق، تتحدد الفجوة البحثية في غياب دراسة تطبيقية متكاملة تجمع بين التحليل المكاني-الزمني طويل المدى لاضطراب سطح الأرض الناتج عن التعدين، باستخدام مؤشرات طيفية مناسبة للبيئات الجافة، مع التركيز على قياس شدة الاضطراب وتحديد امتداده خارج حدود الموقع التعديني في سياق مكاني محلي. ومن هنا تسعى الدراسة الحالية إلى سد هذه الفجوة من خلال توظيف بيانات فضائية متعددة التواريخ للفترة (2015-2025)، وتحليلها باستخدام مؤشري DI و BSI، بما يتيح فهماً أدق لديناميكيات التغير البيئي في محجر خام الحديد بمحافظة الجموم.

النظريات الداعمة للدراسة

يمكن تفسير العلاقة بين النشاط التعديني والتغيرات البيئية في منطقة الدراسة استناداً إلى نظرية اضطراب النظم البيئية التي تفسر أثر الاضطرابات الطبيعية والبشرية في تغيير خصائص النظم الأرضية، وهو ما ينطبق على عمليات الحفر وإزالة الغطاء السطحي داخل محجر خام الحديد وما ينتج عنها من اضطراب واضح في سطح الأرض (Pickett & White, 1985) كما تستند الدراسة إلى نظرية تدهور الأراضي التي توضح التحول التدريجي لفقدان جودة التربة والإنتاجية نتيجة الضغوط البشرية المستمرة، وهو ما يفسر تزايد انكشاف التربة وتراجع خصائصها في المناطق المتأثرة بالنشاط التعديني (UNEP, 1997). كذلك تُسهم نظرية التفاعل بين الإنسان والبيئة في تفسير دور النشاط الاقتصادي البشري في إعادة تشكيل البيئة الطبيعية، من خلال ما تحدته أنشطة التعدين من

تغيرات مكانية وزمانية يمكن رصدها وتحليلها باستخدام تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية (Turner et al., 2003).

اضطراب سطح الأرض:

يرتكز الإطار النظري لهذه الدراسة على تفسير العلاقة بين الأنشطة التعدينية والتغيرات التي تطرأ على سطح الأرض، حيث يُعد اضطراب سطح الأرض من أبرز النتائج المباشرة للنشاط التعديني نتيجة عمليات الحفر، وإزالة الغطاء السطحي، وتكديس المخلفات، وما يصاحب ذلك من إعادة تشكيل للبنية المورفولوجية للسطح. ويؤدي هذا الاضطراب إلى تغير واضح في الخصائص الفيزيائية للأرض، كما يُعد مؤشراً مهماً على حجم التأثير البيئي المرتبط بالتعدين (Sontter et al., 2017).

تدهور التربة:

يُنظر إلى تدهور التربة بوصفه امتداداً مباشراً لاضطراب سطح الأرض، خاصة في البيئات الجافة التي تتسم بحساسية عالية وضعف القدرة على التعافي الطبيعي. إذ يؤدي انكشاف التربة الناتج عن إزالة الغطاء السطحي إلى زيادة تعرضها لعوامل التعرية المائية والريحية، كما يؤثر في خصائصها الفيزيائية مثل الرطوبة والتماسك والبنية، مما يسرع عمليات التدهور ويزيد من استمراريتها على المدى الزمني، ويجعل آثار الاضطراب أكثر وضوحاً واتساعاً في هذه البيئات (IPCC, 2019).

محجر خام الحديد:

يُعرف محجر خام الحديد بأنه موقع تعديني سطحي مفتوح يُستخرج منه خام الحديد من الصخور أو الرواسب الطبيعية لاستخدامه مادة أولية في صناعة الحديد والصلب، ويُعد من أكثر أنواع التعدين السطحي تأثيراً في البيئة الطبيعية نتيجة إزالة الطبقات السطحية وتوليد المخلفات التعدينية (Hartman & Mutmamsky, 2002).

العلاقة بين المفاهيم:

بناءً على ذلك، يقوم الإطار النظري للدراسة على وجود علاقة سببية مترابطة بين المفاهيم الثلاثة، حيث يمثل محجر خام الحديد مصدر النشاط البشري المؤثر في البيئة، إذ تؤدي عمليات الاستخراج والحفر وإزالة الغطاء السطحي وتكديس المخلفات إلى تغيرات مباشرة في شكل سطح الأرض وخصائصه، وهو ما يظهر في صورة اضطراب سطح الأرض، مثل زيادة المساحات المكشوفة، وتكوّن الحفر والردميات، وتغير التضاريس الطبيعية.

ومع استمرار هذا الاضطراب، تبدأ التربة بفقدان توازنها الطبيعي نتيجة إزالة الطبقة السطحية الخصبة، وضعف التماسك، وتزايد تعرضها لعوامل التعرية والانجراف، مما يؤدي إلى تدهور التربة وانخفاض قدرتها البيئية والإنتاجية. وبالتالي فإن اضطراب سطح الأرض يُعد مرحلة أولية تقود تدريجياً إلى تدهور التربة بوصفه أثراً لاحقاً.

ومن هذا المنطلق، فإن المفاهيم الثلاثة تشكل سلسلة متتابعة تبدأ بالنشاط التعديني داخل محجر خام الحديد، ثم اضطراب سطح الأرض، ثم تدهور التربة، وهي علاقة يمكن تحليلها مكانياً وزمانياً باستخدام تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية.

العمل الميداني

تم تنفيذ زيارة ميدانية هادفة في أكتوبر 2024 لدعم نتائج التحليل المعتمد على بيانات الاستشعار عن بعد، والتحقق من دقة التفسير المكاني لاضطراب سطح الأرض في منطقة الدراسة. وقد شمل ذلك زيارة الموقع وتوثيق مشاهدات ميدانية داخل نطاق محجر خام

الحديد ومحيطه، بما يغطي مستويات مختلفة من التأثير بالنشاط التعديني. وجرى توزيع المشاهدات على فئات تمثل اضطراب سطح الأرض، وتدهور التربة، والبنية التشغيلية، إضافة إلى مناطق مرجعية للمقارنة.

واستُخدمت هذه المشاهدات بوصفها تحققاً تفسيرياً داعماً وليس بديلاً عن القياس الحقلية المفصل؛ إذ ساعدت في ربط القيم الطيفية المرتفعة لمؤشري DI وBSI بالمظاهر الفعلية على الأرض، مثل الحفر المفتوحة، والردميات، وانكشاف التربة، وأثار حركة الآليات.

وخلال الزيارة، تم توثيق مواقع النقاط باستخدام نظام تحديد المواقع العالمي (GPS)، إلى جانب التقاط صور ميدانية وتسجيل ملاحظات مباشرة حول الحالة الراهنة لسطح الأرض، مع التركيز على أبرز مظاهر الاضطراب البيئي، مثل الحفر المفتوحة، وتسوية السطح، وانكشاف التربة، وغياب الغطاء النباتي، وتكدس المخلفات التعدينية، والمسارات التشغيلية المرتبطة بالنشاط التعديني.

كما تم الاستعانة بـ صور Google Earth Pro للمقارنة البصرية والتحقق من بعض المظاهر السطحية، وربط المشاهدات الميدانية بالمرئيات الفضائية عالية الدقة. واستخدمت الإحداثيات والصور والملاحظات الميدانية للتحقق من نتائج التحليل، من خلال مقارنة المؤشرات المستخرجة من بيانات الاستشعار عن بعد بالمظاهر الفعلية المرصودة على أرض الواقع.

وقد أظهرت نتائج التحقق الميداني توافقاً واضحاً مع أنماط التغير المكاني المستخرجة من المؤشرات الطيفية، مما أسهم في تعزيز موثوقية النتائج وتحسين دقة تفسير التغيرات البيئية المرتبطة بالنشاط التعديني. ويُعد هذا التحقق عنصراً مهماً في الدراسة، إذ يوفر أساساً واقعياً لتفسير النتائج ويحد من احتمالات الخطأ في التحليل المكاني.

التحقق الميداني من النتائج:

تم إجراء عملية تحقق ميداني لنتائج التحليل الطيفي من خلال الاعتماد على 4 نقاط ميدانية موثقة بالصور داخل منطقة الدراسة، تمثل مواقع ذات درجات مختلفة من الاضطراب السطحي الناتج عن النشاط التعديني.

وقد تمت مقارنة القيم المستخرجة من المؤشرات الطيفية، BSI، DI مع الملاحظات الميدانية لكل نقطة، حيث أظهرت النتائج وجود توافق واضح بين المؤشرات الطيفية والواقع الميداني، إذ عكست المناطق ذات القيم المرتفعة لمؤشر الاضطراب DI نشاطاً تعدينياً مكثفاً، في حين أظهرت المناطق ذات القيم المنخفضة استقراراً نسبياً في خصائص السطح.

إلا أن محدودية عدد نقاط التحقق الميداني تُعد من القيود التي قد تؤثر على دقة التقييم الكمي للنتائج، مما يشير إلى أهمية التوسع في جمع بيانات ميدانية مستقبلية لإجراء تقييم إحصائي أكثر دقة باستخدام مصفوفة الخطأ أو معامل Kappa.

البيانات والأدوات المستخدمة:

اعتمدت الدراسة على بيانات Landsat 8 OLI لعامي 2015 و2020، وبيانات Landsat 9 OLI-2 لعام 2025، المتاحة عبر مستودع USGS Collection 2 Level-2، وهي بيانات مصححة راديو مترياً وجوياً وفق معادلة التحويل القياسية للمجموعة الثانية. وتبلغ الدقة المكانية لهذه البيانات 30 متراً، وقد بلغ إجمالي الصور المستخدمة بعد تطبيق معايير الفترة (4) صور لعام 2015، و(5) صور لعام 2020، و(5) صور لعام 2025، وذلك خلال الفترة الممتدة من مارس إلى مايو لكل سنة لضمان التوافق الموسمي بين مقاطع الزمن الثلاثة.

وقد أجريت جميع عمليات معالجة الصور وحساب المؤشرات الطيفية واستخراج الإحصاءات الكمية باستخدام منصة Google Earth Engine، فيما استخدم برنامج ArcGIS Pro لإنتاج الخرائط الموضوعية النهائية بنظام إسقاط WGS 1984 UTM Zone 37N.

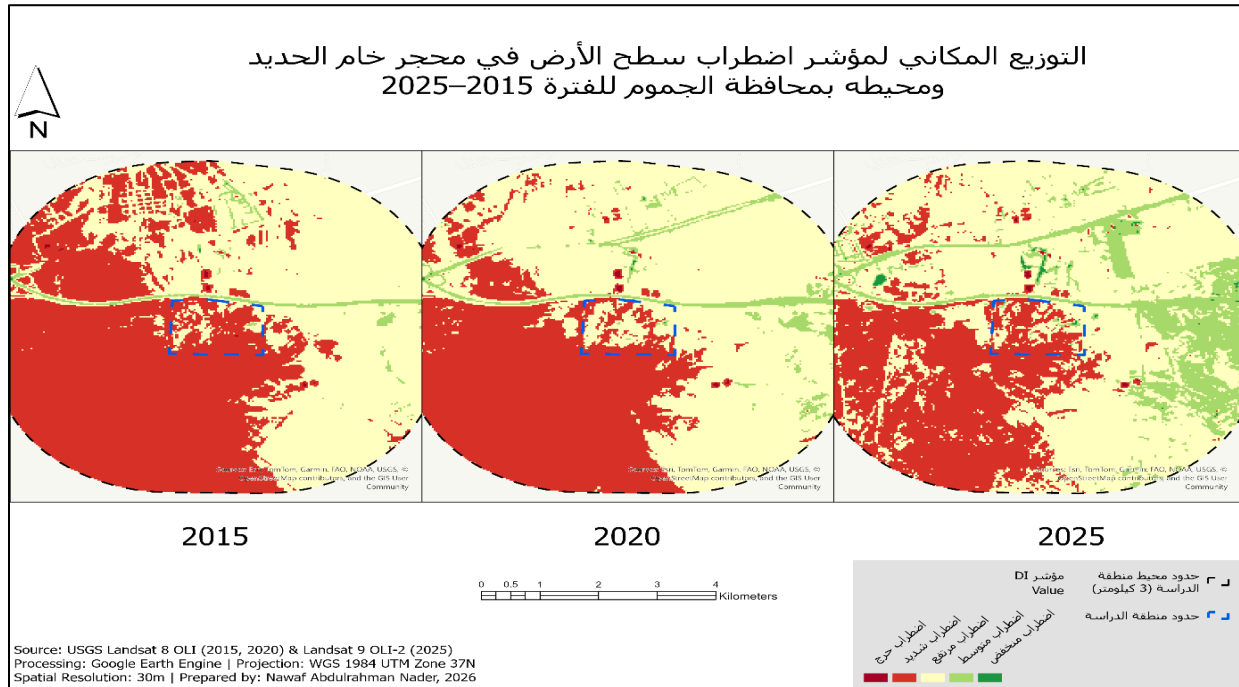
النتائج

1. نتائج مؤشر الاضطراب السطحي (DI):

أظهر مؤشر DI اضطراباً سطحياً حاداً ومستمرًا طوال فترة الدراسة، إذ تراوحت قيم المتوسط بين 0.812 و0.872 في السنوات الثلاث، وهي قيم مرتفعة تعكس اضطراباً شديداً. والأهم من ذلك أن الحد الأقصى ارتفع من 1.385 عام 2015 إلى 1.481 عام 2025 رغم انخفاض المتوسط العام، مما يكشف عن ظاهرة التباين المكاني؛ إذ تشهد نواة المحجر تصاعداً متواصلًا في شدة الاضطراب، في حين يبدو المحيط الخارجي في حالة استقرار نسبي. وتكشف خريطة التغير الكلي عن تراجع في قيم DI بمتوسط (0.060) يعكس تأثيرات موسمية في المحيط، بينما تظهر مناطق ذات قيم مرتفعة جداً تتركز في النواة التعدينية.

جدول (1): الإحصاءات الكمية لمؤشر الاضطراب السطحي (DI) في محجر خام الحديد ومحيطه بمحافظة الجموم خلال الفترة 2015-2025

السنة	المتوسط	الحد الأقصى	الحد الأدنى	الانحراف المعياري
2015	0.8725	1.3853	0.4726	0.0734
2020	0.8468	1.2678	0.4352	0.0783
2025	0.8124	1.4806	0.2380	0.0849
التغير 2015-2025	-0.0601	0.6468	-0.6820	0.0521



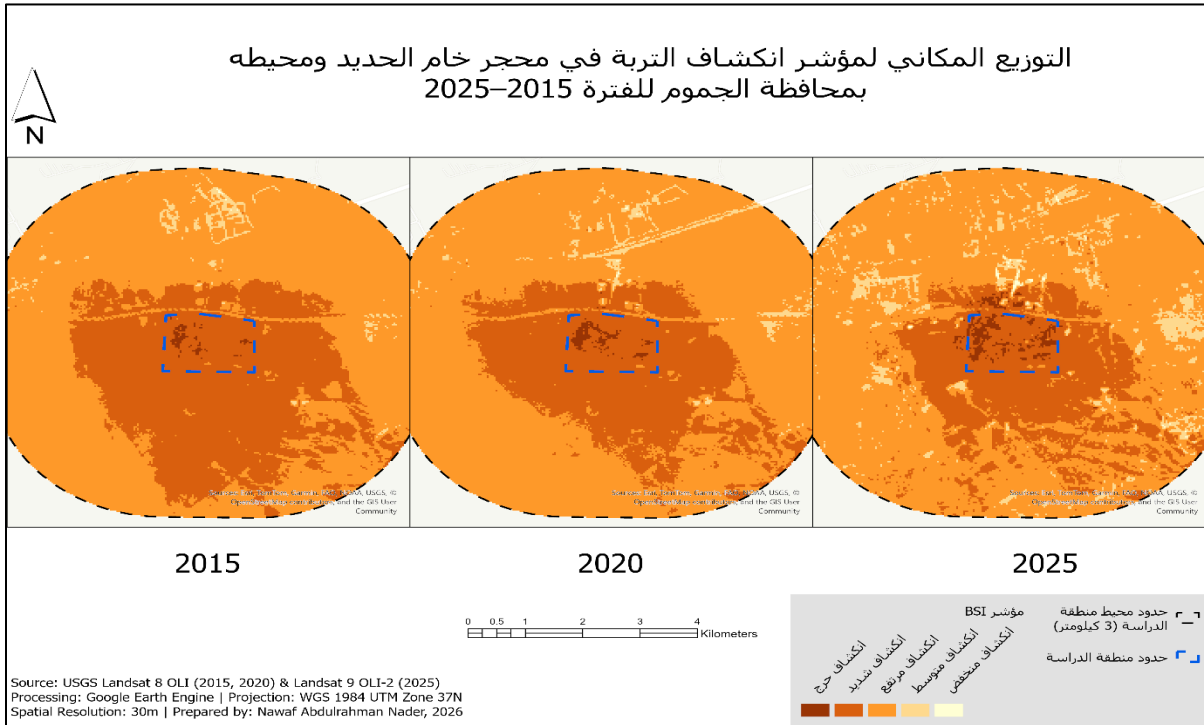
شكل (2): التوزيع المكاني لمؤشر الاضطراب السطحي (DI) في محجر خام الحديد ومحيطه بمحافظة الجموم للفترة 2015-2025

(2) نتائج مؤشر انكشاف التربة (BSI):

كشف تحليل مؤشر BSI عن ارتفاع مستمر في قيم انكشاف التربة داخل نطاق المحجر ومحيطه طوال الفترة 2015-2025، إذ تراوحت قيم المتوسط بين 0.198 و0.204 في السنوات الثلاث، وهي قيم تدل على انكشاف شديد ومزمن للتربة. وقد سجل الحد الأقصى ارتفاعاً من 0.301 عام 2015 إلى 0.313 عام 2025، ويفسر انخفاض المتوسط العام من 0.204 إلى 0.198 بالتحول في التوزيع المكاني للانكشاف؛ إذ باتت مناطق الانكشاف المنخفض في أطراف البئر أكثر اتساعاً، في حين تركزت قيم الانكشاف الحرج في نواة المحجر وازداد تشعبها، وهو ما يعكس نضج الاضطراب وتعمقه في المناطق الأكثر تأثراً بدلاً من توسعه الأفقي.

جدول (2): الإحصاءات الكمية لمؤشر انكشاف التربة (BSI) في محجر خام الحديد ومحيطه بمحافظة الجموم خلال الفترة 2015-2025

السنة	المتوسط	الحد الأقصى	الحد الأدنى	الانحراف المعياري
2015	0.2037	0.3007	0.0739	0.0160
2020	0.2020	0.2920	0.0380	0.0163
2025	0.1979	0.3126	-0.0011	0.0213
التغير 2015-2025	-0.0058	0.1099	-0.2029	0.0142



شكل (3): التوزيع المكاني لمؤشر انكشاف التربة (BSI) في محجر خام الحديد ومحيطه بمحافظة الجموم للفترة 2015-2025

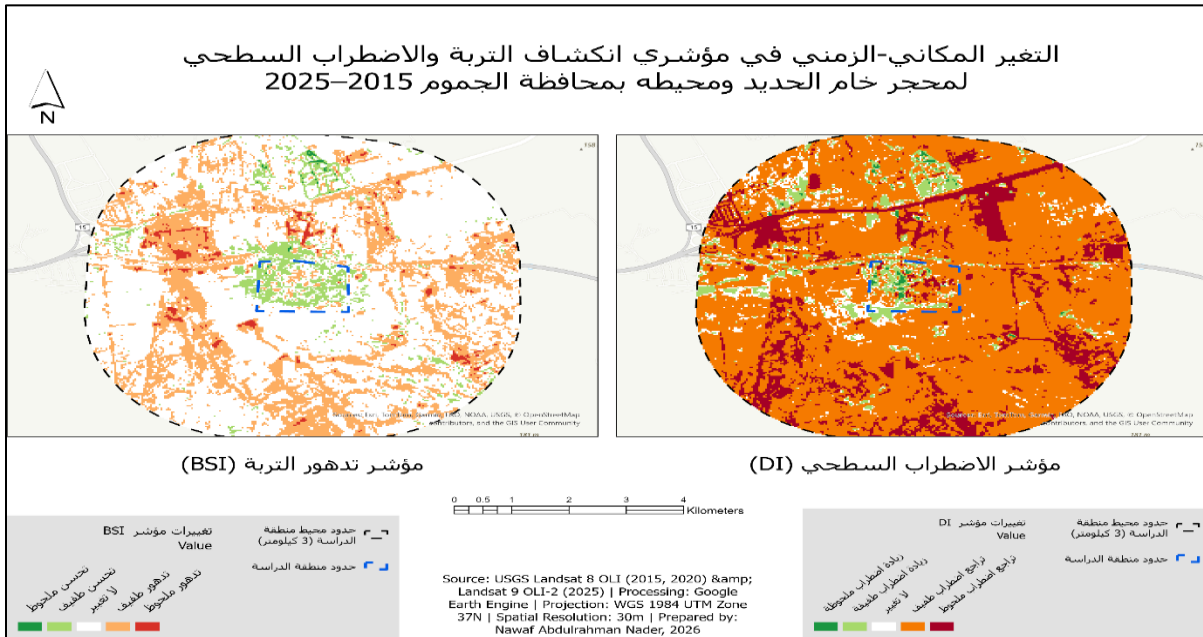
(3) نتائج التغير المكاني-الزمني الكلي لمؤشري الاضطراب السطحي وانكشاف التربة:

تكشف خريطة التغير الكلي خلال الفترة 2015-2025 عن الأنماط المكانية لتطور كل من انكشاف التربة والاضطراب السطحي معاً، مما يتيح تقييماً شاملاً لمسار التدهور البيئي في منطقة الدراسة. وتُظهر نتائج مؤشر BSI أن التغير الكلي في انكشاف التربة بلغ متوسطه (-0.006) مع حد أقصى موجب (+0.110) وحد أدنى سالب (-0.203)، مما يدل على وجود مناطق ازداد فيها الانكشاف ومناطق أخرى شهدت استقراراً نسبياً. أما مؤشر DI فقد سجّل تغيراً كلياً بمتوسط (-0.060) مع حد أقصى (+0.647) وحد أدنى (-0.682)، مما يكشف عن تباين مكاني واضح بين نواة المحجر التي ازداد فيها الاضطراب والمحيط الخارجي الذي شهد استقراراً نسبياً مؤقتاً.

جدول (3): الإحصاءات الكمية للتغير الكلي في مؤشري الاضطراب السطحي (DI) وانكشاف التربة (BSI) في محجر خام الحديد ومحيطه بمحافظة الجموم خلال الفترة 2015-2025

المؤشر	المتوسط	الحد الأقصى	الحد الأدنى	الانحراف المعياري
تغير DI	-0.060	+0.647	-0.682	0.052
تغير BSI	-0.006	+0.110	-0.203	0.014

وللتعبير عن حجم التغير بصورة كمية مقارنة، تم احتساب نسبة التغير المؤمية لمتوسط كل مؤشر بين عامي 2015 و2025؛ إذ بلغت نسبة تغير مؤشر BSI (-2.8%)، ونسبة تغير مؤشر DI (-6.9%)، وتشير هذه النسب إلى أن الاضطراب السطحي شهد تراجعاً في متوسطه الكلي مصحوباً بتصاعد في شدته القصوى، مما يؤكد النمط المكاني المتمثل في تعمق الاضطراب في النواة واستقرار نسبي في المحيط، ولا يعني انخفاض المتوسط العام للمؤشر بالضرورة تعافياً بيئياً شاملاً، بل قد يعكس تغيراً في التوزيع المكاني للقيم بين نواة المحجر ومحيطه؛ لذلك فسرت النتائج بالجمع بين المتوسطات، والحدود القصوى، وخرائط التوزيع المكاني، والملاحظات الميدانية.



شكل (4): التغير المكاني-الزمني الكلي في مؤشري الاضطراب السطحي (DI) وانكشاف التربة (BSI) في محجر خام الحديد ومحيطه بمحافظة الجموم خلال الفترة 2015-2025

تُظهر نتائج التحليل المكاني-الزمني لمؤشري الاضطراب السطحي (DI) وانكشاف التربة (BSI) تركيز التأثيرات البيئية داخل النواة التعدينية وامتدادها بدرجات متفاوتة نحو المحيط المجاور. ولتعزيز تفسير النتائج وربطها بالواقع، تم الاستعانة بالملاحظات الميدانية كما في الشكل (5) وذلك للتحقق من دقة هذه النتائج وربطها بالواقع الميداني.



(ب) عمليات الحفر والتسوية باستخدام الآليات الثقيلة وتأثيرها على مورفولوجية السطح.



(أ) انكشاف التربة وتسوية سطح الأرض نتيجة الأنشطة التعدينية.



(د) الامتداد المكاني للنشاط التعديني وتراكم نواتج الحفر داخل منطقة الدراسة.



(ج) آثار الضغط الميكانيكي للتربة الناتج عن حركة المركبات داخل الموقع.

شكل (5): مشاهدات ميدانية توضح مظاهر اضطراب سطح الأرض وتدهور التربة داخل محجر خام الحديد بمنطقة الجموم (أكتوبر 2024).

يتضح من المشاهدات الميدانية في الشكل (5) وجود حفر تعدينية مفتوحة وتدرجات طبقيّة واضحة ناتجة عن عمليات الاستخراج، إضافة إلى أعمال تسوية ميكانيكية مكثفة باستخدام الآليات الثقيلة، وهو ما يعكس تغيراً جوهرياً في الخصائص المورفولوجية لسطح الأرض. كما تُظهر الصور انكشافاً شبه كامل للتربة وغياباً للغطاء النباتي داخل نطاق المحجر، إلى جانب وجود طرق تشغيلية وآثار ضغط ميكانيكي للتربة.

وتتوافق هذه المظاهر مع نتائج التحليل الطيفي، حيث ترتبط مناطق الحفر والتجريف بارتفاع قيم مؤشر الاضطراب السطحي (DI)، في حين يعكس انكشاف التربة وغياب الغطاء النباتي ارتفاع قيم مؤشر (BSI) ويؤكد هذا التوافق بين البيانات الفضائية والمشاهدات الميدانية موثوقة نتائج الدراسة ودقة تفسير التغيرات المكانية المرتبطة بالنشاط التعديني.

المناقشة

تتسق نتائج هذه الدراسة مع ما أثبتته الدراسات السابقة من استمرارية التدهور البيئي في مناطق التعدين الجافة، وتضيف إليها بعداً مكانياً-زمنياً دقيقاً يكشف عن آليات هذا التدهور وأنماط امتداده في سياق بيئي محلي لم يحظ بالدراسة الكافية في الأدبيات الإقليمية.

وتدعم المشاهدات الميدانية (شكل 5) ما أظهرته نتائج مؤشري DI و BSI من ارتفاع واضح في مستويات اضطراب سطح الأرض داخل نطاق الأنشطة التعدينية.

أولاً — استمرارية الاضطراب السطحي وتدهور التربة:

كشفت مؤشر الاضطراب السطحي (DI) عن اضطراب حاد ومستمر طوال الفترة 2015–2025، إذ تراوحت قيم المتوسط بين 0.812 و 0.872، وهي قيم مرتفعة تعكس ضغطاً تعدينياً متواصلًا على سطح الأرض. وتتوافق هذه النتيجة في مضمونها مع ما رصدته دراسة Sonter et al (2017) من أن الأنشطة التعدينية تُحدث تغييرات بيئية بالغة الأثر تمتد إلى ما هو أبعد من حدود الموقع المرخص، وإن كانت تلك الدراسة اهتمت بالغابات الاستوائية في الأمازون، إلا أن المبدأ العام يتسق مع ما أثبتته الدراسة الحالية في سياق البيئة الجافة بمحافظة الجموم. كما يتسق ارتفاع قيم مؤشر BSI فوق 0.19 في كل السنوات مع ما أشارت إليه دراسة Rikimaru et al (2002) من أن البيئات الجافة تُسجل قيم انكشاف تربة مرتفعة بصورة مزمنة نتيجة محدودية الغطاء السطحي الطبيعي، وهو ما يتفاقم بفعل الأنشطة التعدينية المستمرة.

ثانياً — ظاهرة التباين المكاني بين النواة والمحيط:

تكشف النتائج عن نمط مكاني مميز يتمثل في ازدواجية التأثير، وتتقارب هذه النتائج مع ما رصدته دراسة Xiao et al (2020) في منطقة تعدين الفحم بمنغوليا الداخلية من قيم اضطراب مرتفعة تتمركز في نواة الموقع وتراجع تدريجياً باتجاه المحيط، وإن كانت نتائج دراستنا تُظهر قيم DI أعلى (0.81–0.87) مقارنةً بالسياقات الصينية نظراً لحدة الجفاف وضعف قدرة التعافي الطبيعي في البيئة شبه الجافة بمحافظة الجموم.

ثالثاً — امتداد التأثير خارج حدود المحجر:

تثبتت نتائج مؤشر BSI امتداد مناطق الانكشاف الشديد ($BSI > 0.25$) جنوباً خارج حدود المحجر الرسمية، وهو ما يؤكد أن نطاق التأثير البيئي للنشاط التعديني لا يقتصر على حدود الموقع المرخص. وينبغي تفسير هذه العتبة بوصفها عتبة تفسيرية محلية مستندة إلى توزيع القيم داخل منطقة الدراسة وارتباطها بالمشاهدات الميدانية، وليست معياراً عالمياً ثابتاً لجميع البيئات الجافة. ويتوافق ذلك مع ما خلصت إليه دراسة O'Donnell et al (2024) من أن بيانات الاستشعار عن بعد يمكن أن تدعم تقييم آثار التعدين ومراقبة التعافي عندما تكون أهداف التعافي ومؤشراته محددة وقابلة للقياس. كما تتسق هذه النتيجة مع ما أكدته أدبيات الأراضي الجافة من أن آثار الاضطراب في هذه البيئات أكثر بقاءً واتساعاً بسبب محدودية الغطاء النباتي وضعف التعافي الطبيعي.

رابعاً — التأثيرات الموسمية وحدود التفسير:

يُلاحظ في عام 2025 ظهور مناطق ذات قيم DI منخفضة في أطراف منطقة الدراسة، مما قد يوحي بتحسين بيئي ظاهري. غير أن مقارنة هذه النتيجة مع قيم BSI المرتفعة في نفس الفترة تكشف أن هذا الانخفاض قد يعكس استجابةً طيفية مؤقتة للرطوبة أو للأمطار التي شهدتها المنطقة، وليس تعافياً بيئياً مؤكداً. وتتوافق هذه الملاحظة مع ما أشارت إليه دراسة Yang et al (2018) من أن التحليل الزمني قادر على التمييز بين التغيرات المؤقتة الناتجة عن العوامل المناخية والتغيرات البنوية المرتبطة بالنشاط البشري، وهو ما يُعزز من قيمة التحليل المتكامل لمؤشرين مختلفين بدلاً من الاعتماد على مؤشر واحد.

خامساً — الإسهام في سد الفجوة البحثية:

تُسهّم هذه الدراسة في سد الفجوة البحثية المحددة في مراجعة الأدبيات من خلال ثلاثة محاور: أولها تقديم تحليل مكاني-زمني متكامل لاضطراب سطح الأرض في بيئة جافة سعودية لم تحظ بدراسة مماثلة، وثانيها توظيف مؤشري BSI و DI معاً لرصد بُعدين متكاملين من أبعاد التدهور البيئي، وثالثها تحديد امتداد التأثير خارج حدود الموقع التعديني بصورة كمية ومكانية دقيقة. وبذلك تُقدم الدراسة نموذجاً منهجياً قابلاً للتطبيق على مواقع تعدينية مماثلة في المنطقة، وتُوفّر أداةً علمية موضوعية تدعم قرارات الإدارة البيئية وبرامج إعادة التأهيل.

الخاتمة والتوصيات

الخاتمة:

تناولت هذه الدراسة تحليل التغير المكاني-الزمني لاضطراب سطح الأرض وتدهور التربة في محجر خام الحديد ومحيطه بمحافظة الجموم خلال الفترة 2015-2025، باستخدام مؤشر الاضطراب السطحي (DI) وانكشاف التربة (BSI) المستخرجين من بيانات Landsat 8/9 عبر منصة Google Earth Engine. وقد أسفر التحليل المكاني-الزمني عن جملة من النتائج التي تُجيب على أهداف الدراسة الثلاثة:

أولاً — أثبتت الدراسة استمرارية الاضطراب السطحي المزمّن طوال الفترة 2015-2025، إذ ظلت قيم مؤشر DI فوق 0.80 في كل السنوات، وقيم مؤشر BSI فوق 0.19، مما يُثبت أن النشاط التعديني يُحدث ضغطاً بيئياً متواصلاً على سطح الأرض والتربة.

ثانياً — كشفت الدراسة عن ظاهرة التباين المكاني بين نواة المحجر ومحيطه؛ إذ ازداد الحد الأقصى لمؤشر DI من 1.385 عام 2015 إلى 1.481 عام 2025 مما يدل على تصاعد الاضطراب في النواة، في حين يعكس انخفاض المتوسط العام استقراراً نسبياً في المحيط الخارجي.

ثالثاً — أثبتت الدراسة امتداد التأثير البيئي خارج الحدود الرسمية للمحجر، لا سيما في الاتجاه الجنوبي، مما يؤكد أن نطاق التقييم البيئي لمواقع التعدين يجب أن يتجاوز حدود الترخيص ليشمل المحيط المكاني المجاور.

وبذلك تُقدّم هذه الدراسة نموذجاً منهجياً متكاملًا يجمع بين التحليل المكاني-الزمني وتوظيف مؤشرات طيفية مناسبة للبيئات الجافة، مما يُسهم في سد الفجوة البحثية في الأدبيات الإقليمية المتعلقة برصد مواقع التعدين في المملكة العربية السعودية.

وتواجه الدراسة بعض المحددات، من أبرزها الاعتماد على بيانات Landsat ذات دقة مكانية متوسطة (30م)، مما قد يؤثر على دقة تمثيل التفاصيل الدقيقة داخل الموقع التعديني، إضافة إلى محدودية العمل الميداني زمنياً، والاقتصار على ثلاث نقاط زمنية ممثلة داخل الفترة 2015-2025 بدلاً من تحليل سنوي كامل. كما أن التحقق الميداني المستخدم في هذه الدراسة تحقق تفسيري داعم، ولا يغني عن القياسات الحقلية التفصيلية لخصائص التربة في الدراسات المستقبلية.

التوصيات:

في ضوء نتائج الدراسة واستنتاجاتها يوصي الباحث بما يأتي:

أولاً — على المستوى التقني والرصد البيئي:

اعتماد نظام رصد دوري بالاستشعار عن بعد لمواقع التعدين في المملكة لا يقل عن مرة كل عامين، مع توظيف مؤشري BSI وDI كأدوات قياسية في برامج المراقبة البيئية لمواقع التعدين في البيئات الجافة.

ثانياً — على مستوى التقييم البيئي:

توسيع نطاق تقييم الأثر البيئي للمواقع التعدينية ليشمل المحيط المكاني خارج حدود الترخيص بمسافة لا تقل عن 3 كيلومترات، نظراً لما أثبتته الدراسة من امتداد التأثيرات البيئية خارج الحدود الرسمية.

ثالثاً — على مستوى السياسات والتشريعات:

إدراج مؤشري BSI وDI ضمن اشتراطات تقييم الأثر البيئي للمشاريع التعدينية في البيئات الجافة بالمملكة، وتحديث الاشتراطات البيئية السعودية لتشمل متطلبات الرصد الدوري بالاستشعار عن بعد لمواقع التعدين النشطة.

رابعاً — على مستوى البحث العلمي:

تطبيق منهجية الدراسة على مواقع تعدينية مماثلة في المملكة لبناء قاعدة بيانات بيئية مرجعية تُمكن من المقارنة بين المواقع وتتبع مسارات التدهور على المستوى الوطني، إضافةً إلى إجراء دراسات مستقبلية تدمج بيانات الاستشعار عن بعد مع تحاليل التربة الميدانية للتحقق الكمي من مستويات التدهور الفعلي.

حدود الدراسة وقابلية التعميم:

تُعد نتائج الدراسة قابلة للتعميم المنهجي على مواقع تعدين مشابهة في البيئات الجافة وشبه الجافة، لكنها لا تعني تطابق القيم الرقمية للمؤشرات بين المواقع؛ إذ تتأثر قيم DI وBSI بنوع الصخور، ولون التربة، والرطوبة السطحية، وكثافة الغطاء النباتي، وتوقيت الصورة الفضائية. لذلك توصي الدراسة بإعادة معايرة عتبات التصنيف عند تطبيق المنهجية على مواقع أخرى، ودمج تحاليل تربة ميدانية وصور أعلى دقة عندما يكون الهدف إصدار أحكام تنظيمية أو قانونية دقيقة.

توافر البيانات: تعتمد الدراسة على بيانات Landsat Collection 2 Level-2 المتاحة عبر منصة Google Earth Engine، إضافةً إلى حدود منطقة الدراسة والمشاهدات الميدانية التي جُمعت لأغراض هذا البحث. ولا تتضمن الدراسة بيانات شخصية أو معلومات حساسة.

المراجع

أولاً — المراجع العربية:

- محمد، سارة كاظم. (2012). تكامل بيانات الاستشعار عن بعد (RS) ونظم المعلومات الجغرافية (GIS) لدراسة تدهور التربة وتملحها في سورية (رقعة السلمية). مجلة البحوث الجغرافية، (16)، 405-425.

ثانياً — المراجع الدولية:

- Abu Abdullah, M. M., Youssef, A. M., Nashar, F., & Abu AlFadail, E. (2019). Statistical analysis of rainfall patterns in Jeddah city, KSA: Future impacts. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.86774>
- Baig, M. H. A., Zhang, L., Shuai, T., & Tong, Q. (2014). Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance. Remote Sensing Letters, 5(5), 423-431. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2014.915434>
- Biancalani, R., Nachtergaele, F., Petri, M., & Bunning, S. (2013). Land degradation assessment in drylands: Methodology and results. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Hartman, H. L., & Mutmansky, J. M. (2002). Introductory mining engineering (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Healey, S. P., Cohen, W. B., Yang, Z., & Krankina, O. N. (2005). Comparison of Tasseled Cap-based Landsat data structures for use in forest disturbance detection. Remote Sensing of Environment, 97(3), 301-310. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.05.009>
- IPCC. (2019). Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Intergovernmental Panel on Climate Change.

- O'Donnell, M. S., Whipple, A. L., Inman, R. D., Tarbox, B. C., Monroe, A. P., Robb, B. S., & Aldridge, C. L. (2024). Remote sensing for monitoring mine lands and recovery efforts. U.S. Geological Survey Circular 1525. <https://doi.org/10.3133/cir1525>
- Pickett, S. T. A., & White, P. S. (1985). The ecology of natural disturbance and patch dynamics. Academic Press.
- Rikimaru, A., Roy, P. S., & Miyatake, S. (2002). Tropical forest cover density mapping. *Tropical Ecology*, 43(1), 39–47.
- Sonter, L. J., Herrera, D., Barrett, D. J., Galford, G. L., Moran, C. J., & Soares-Filho, B. S. (2017). Mining drives extensive deforestation in the Brazilian Amazon. *Nature Communications*, 8, 1013. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00557-w>
- Turner, B. L., Kasperson, R. E., Matson, P. A., McCarthy, J. J., Corell, R. W., Christensen, L., Eckley, N., Kasperson, J. X., Luers, A., Martello, M. L., Polsky, C., Pulsipher, A., & Schiller, A. (2003). A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(14), 8074–8079. <https://doi.org/10.1073/pnas.1231335100>
- Tyukavina, A., Hansen, M. C., Potapov, P. V., Stehman, S. V., Smith-Rodriguez, K., Okpa, C., & Aguilar, R. (2017). Types and rates of forest disturbance in Brazilian Legal Amazon, 2000–2013. *Science Advances*, 3(4), e1601047. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1601047>
- UNEP. (1997). *World atlas of desertification* (2nd ed.). Edward Arnold.
- Xiao, W., Deng, X., He, T., & Chen, W. (2020). Mapping annual land disturbance and reclamation in a surface coal mining region using Google Earth Engine and the LandTrendr algorithm: A case study of the Shengli Coalfield in Inner Mongolia, China. *Remote Sensing*, 12(10), 1612. <https://doi.org/10.3390/rs12101612>
- Xu, Y., Yang, G., Zhang, Y., Guo, J., & Zhang, C. (2025). Mapping and interpreting spatio-temporal trends in vegetation restoration following mining disturbances in large-scale surface coal mining areas. *Frontiers in Environmental Science*, 13, 1531424. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1531424>
- Yang, Y., Erskine, P. D., Lechner, A. M., Mulligan, D., Zhang, S., & Wang, Z. (2018). Detecting the dynamics of vegetation disturbance and recovery in surface mining area via Landsat imagery and LandTrendr algorithm. *Journal of Cleaner Production*, 178, 353–362. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.050>

الملاحق

ملحق (أ): كود Google Earth Engine المستخدم في معالجة بيانات Landsat

يوثق هذا الملحق الكود المستخدم في تحديد منطقة الدراسة، معالجة بيانات Landsat Collection 2 Level-2، حجب السحب والظلال، حساب مؤشري BSI وDI، استخراج الإحصاءات الكمية، وإخراج الطبقات النهائية.

```
===== //
Landsat ملحق أ: كود Google Earth Engine المستخدم في معالجة بيانات //
المؤشرات: DI و BSI //
البيانات: Landsat Collection 2 Level-2 //
الإسقاط: WGS 1984 UTM Zone 37N — EPSG:32637 //
الدقة المكانية: 30 m //
===== //
```

```
// 1. منطقة الدراسة: حدود المحجر ونطاق 3 km
]]var quarry = ee.Geometry.Polygon
,[21.680970 ,39.508093]
,[21.681241 ,39.513671]
,[21.679886 ,39.522968]
,[21.670332 ,39.523005]
,[21.670569 ,39.507510]
[21.680970 ,39.508093]
;[[
```

```
;)var roi = quarry.buffer(3000).bounds
```

```
;Map.centerObject(roi, 13)
;(true, 0.9 , 'حدود المحجر', quarry, {color: 'FF0000'})Map.addLayer
;(km', true, 0.73 , 'منطقة الدراسة', roi, {color: '000000'})Map.addLayer
```

```
Landsat Collection 2 Level-2 لبيانات تصحيح الراديو متري //
SR = DN * 0.0000275 - 0.2 //
} function applyScaleFactors(image)
var optical = image.select('SR_B.')
(0.0000275)multiply.
(0.2-)add.
;(1 ,0)clamp.
;return image.addBands(optical, null, true)
{
```

```
QA_PIXEL بإزالة السحب والظلال باستخدام //
} function maskClouds(image)
;var qa = image.select('QA_PIXEL')
var cloudMask = qa.bitwiseAnd(1 << 3).eq(0) // Cloud
and(qa.bitwiseAnd(1 << 4).eq(0)) // Cloud Shadow.
and(qa.bitwiseAnd(1 << 1).eq(0)); // Dilated Cloud.
;return image.updateMask(cloudMask)
{
```

```
// 4. حساب مؤشري BSI و DI
```

```
} function addIndices(image)
var B2 = image.select('SR_B2'); // Blue
var B3 = image.select('SR_B3'); // Green
var B4 = image.select('SR_B4'); // Red
var B5 = image.select('SR_B5'); // NIR
var B6 = image.select('SR_B6'); // SWIR1
var B7 = image.select('SR_B7'); // SWIR2

BSI = ((SWIR1 + Red) - (NIR + Blue)) / ((SWIR1 + Red) + (NIR + Blue)) //
)var bsi = image.expression
,'((SWIR1 + RED) - (NIR + BLUE)) / ((SWIR1 + RED) + (NIR + BLUE))'
{SWIR1': B6, 'RED': B4, 'NIR': B5, 'BLUE': B2}
;'rename('BSI.(

DI = Brightness - (Greenness + Wetness) //
.(2014) .Tasseled Cap coefficients for Landsat 8/9 OLI are based on Baig et al //
)var tcb = image.expression
,'(0.3029*B2) + (0.2786*B3) + (0.4733*B4) + (0.5599*B5) + (0.5080*B6) + (0.1872*B7)'
{B2': B2, 'B3': B3, 'B4': B4, 'B5': B5, 'B6': B6, 'B7': B7}
;(
)var tcg = image.expression
,'*B2) + (-0.2430*B3) + (-0.5424*B4) + (0.7276*B5) + (0.0713*B6) + (-0.1608*B7)0.2941-'
{B2': B2, 'B3': B3, 'B4': B4, 'B5': B5, 'B6': B6, 'B7': B7}
;(
)var tcw = image.expression
,'(0.1511*B2) + (0.1973*B3) + (0.3283*B4) + (0.3407*B5) + (-0.7117*B6) + (-0.4559*B7)'
{B2': B2, 'B3': B3, 'B4': B4, 'B5': B5, 'B6': B6, 'B7': B7}
;(
;var di = tcb.subtract(tcg.add(tcw)).rename('DI')

;return image.addBands([bsi, di])
{

5 // تحميل الصور ومعالجتها وإنشاء مركب موسمي بالوسيط
} function getImage(startDate, endDate, collection)
return ee.ImageCollection(collection)
filterBounds(roi).
filterDate(startDate, endDate).
filter(ee.Filter.lt('CLOUD_COVER', 10)).
map(applyScaleFactors).
map(maskClouds).
map(addIndices).
()median.
;clip(roi).
{

6 // تحميل صور مارس-مايو للسنوات المختارة
```

```
;var img2015 = getImage('2015-03-01', '2015-05-31', 'LANDSAT/LC08/C02/T1_L2')
;var img2020 = getImage('2020-03-01', '2020-05-31', 'LANDSAT/LC08/C02/T1_L2')
;var img2025 = getImage('2025-03-01', '2025-05-31', 'LANDSAT/LC09/C02/T1_L2')
```

```
// التحقق من عدد الصور المستخدمة وتواريخها
var col2015 = ee.ImageCollection('LANDSAT/LC08/C02/T1_L2')
('31-05-2015', '01-03-2015').filterBounds(roi).filterDate.
;filter(ee.Filter.lt('CLOUD_COVER', 10)).
var col2020 = ee.ImageCollection('LANDSAT/LC08/C02/T1_L2')
('31-05-2020', '01-03-2020').filterBounds(roi).filterDate.
;filter(ee.Filter.lt('CLOUD_COVER', 10)).
var col2025 = ee.ImageCollection('LANDSAT/LC09/C02/T1_L2')
('31-05-2025', '01-03-2025').filterBounds(roi).filterDate.
;filter(ee.Filter.lt('CLOUD_COVER', 10)).
```

```
('=== التحقق من الصور المستخدمة ===')print
;(()col2015.size, ':2015 عدد صور')print
;(col2015.aggregate_array('DATE_ACQUIRED'), ':تواريخ 2015')print
;(()col2020.size, ':2020 عدد صور')print
;(col2020.aggregate_array('DATE_ACQUIRED'), ':تواريخ 2020')print
;(()col2025.size, ':2025 عدد صور')print
;(col2025.aggregate_array('DATE_ACQUIRED'), ':تواريخ 2025')print
```

```
7 // استخراج المؤشرات
;var bsi2015 = img2015.select('BSI')
;var bsi2020 = img2020.select('BSI')
;var bsi2025 = img2025.select('BSI')
```

```
;var di2015 = img2015.select('DI')
;var di2020 = img2020.select('DI')
;var di2025 = img2025.select('DI')
```

```
8 // خرائط التغير الكلي 2015-2025
;var bsi_change = bsi2025.subtract(bsi2015).rename('BSI_Change_2015_2025')
;var di_change = di2025.subtract(di2015).rename('DI_Change_2015_2025')
```

```
9 // عرض الخرائط
;var rgbVis = {bands: ['SR_B4', 'SR_B3', 'SR_B2'], min: 0.02, max: 0.20}
} = var bsiVis
,min: 0.07, max: 0.32
palette: ['#FFFFD4', '#FED98E', '#FE9929', '#D95F0E', '#993404']
;{
} = var diVis
,min: 0.41, max: 1.31
palette: ['#1A9850', '#A6D96A', '#FFFFBF', '#D73027', '#A50026']
;{
} = var bsiChangeVis
```

```
,min: -0.22, max: 0.11  
palette: ['#1A9641', '#A6D96A', '#FFFFFF', '#FDAE61', '#D73027']  
;{  
} = var diChangeVis  
,min: -0.45, max: 0.41  
palette: ['#A50026', '#D73027', '#FFFFFF', '#A6D96A', '#1A9641']  
;{
```

```
;Map.addLayer(img2015, rgbVis, 'RGB 2015', false)  
;Map.addLayer(img2020, rgbVis, 'RGB 2020', false)  
;Map.addLayer(img2025, rgbVis, 'RGB 2025', false)
```

```
;Map.addLayer(bsi2015, bsiVis, 'BSI 2015')  
;Map.addLayer(bsi2020, bsiVis, 'BSI 2020')  
;Map.addLayer(bsi2025, bsiVis, 'BSI 2025')
```

```
;Map.addLayer(di2015, diVis, 'DI 2015')  
;Map.addLayer(di2020, diVis, 'DI 2020')  
;Map.addLayer(di2025, diVis, 'DI 2025')
```

```
;Map.addLayer(bsi_change, bsiChangeVis, 'BSI change 2015-2025')  
;Map.addLayer(di_change, diChangeVis, 'DI change 2015-2025')
```

10 // الإحصاءات الكمية

```
()var reducer = ee.Reducer.mean  
combine(ee.Reducer.stdDev(), null, true).  
combine(ee.Reducer.min(), null, true).  
;combine(ee.Reducer.max(), null, true).
```

```
;var params = {reducer: reducer, geometry: roi, scale: 30, maxPixels: 1e9}
```

```
;('=== إحصاءات BSI ===')print  
;print('BSI 2015:', bsi2015.reduceRegion(params))  
;print('BSI 2020:', bsi2020.reduceRegion(params))  
;print('BSI 2025:', bsi2025.reduceRegion(params))  
;print('BSI change:', bsi_change.reduceRegion(params))
```

```
;('=== إحصاءات DI ===')print  
;print('DI 2015:', di2015.reduceRegion(params))  
;print('DI 2020:', di2020.reduceRegion(params))  
;print('DI 2025:', di2025.reduceRegion(params))  
;print('DI change:', di_change.reduceRegion(params))
```

11 // التصدير إلى Google Drive

```
'var folderName = 'Aljoum_Final  
'var scale = 30  
'var outCrs = 'EPSG:32637
```

```
;var maxPixels = 1e9
```

```
Export.image.toDrive({image: bsi2015, description: 'BSI_2015', folder: folderName, region: roi, scale: scale, crs:  
;outCrs, maxPixels: maxPixels})
```

```
Export.image.toDrive({image: bsi2020, description: 'BSI_2020', folder: folderName, region: roi, scale: scale, crs:  
;outCrs, maxPixels: maxPixels})
```

```
Export.image.toDrive({image: bsi2025, description: 'BSI_2025', folder: folderName, region: roi, scale: scale, crs:  
;outCrs, maxPixels: maxPixels})
```

```
Export.image.toDrive({image: bsi_change, description: 'BSI_Change_2015_2025', folder: folderName, region: roi,  
;scale: scale, crs: outCrs, maxPixels: maxPixels})
```

```
Export.image.toDrive({image: di2015, description: 'DI_2015', folder: folderName, region: roi, scale: scale, crs: outCrs,  
;maxPixels: maxPixels})
```

```
Export.image.toDrive({image: di2020, description: 'DI_2020', folder: folderName, region: roi, scale: scale, crs: outCrs,  
;maxPixels: maxPixels})
```

```
Export.image.toDrive({image: di2025, description: 'DI_2025', folder: folderName, region: roi, scale: scale, crs: outCrs,  
;maxPixels: maxPixels})
```

```
Export.im
```