

دمج بيانات الأقمار الصناعية Sentinel-2 و ASTER لرسم خرائط تمعدن الذهب في منطقة أرياب، شمال شرق السودان

الملخص

يهدف هذا البحث إلى تطوير نهج احترافي لكشف التمعدين الذهبي باستخدام بيانات القمر الصناعي Sentinel-2 و ASTER، مع التركيز على تقنيات معالجة الصور المتقدمة مثل نسب النطاقات (Band Ratios)، تحليل المكونات الرئيسية (PCA)، تحول الحد الأدنى للضوضاء (MNF)، ونماذج التعلم الآلي مثل غابة عشوائية (Random Forest). تم تطبيق هذا النهج في منطقة أرياب ضمن الدرع العربي النوبي (Arabian-Nubian Shield)، حيث يُعرف بوجود تمعدن ذهبي مرتبط بتغيرات هيدروحرارية. أظهرت النتائج تحديد مناطق محتملة للذهب بدقة تصل إلى 88.7%، مع تحسين عند دمج البيانات بين Sentinel-2 و ASTER. يُقدم هذا البحث إطاراً عملياً للاستكشاف الجيولوجي في المناطق الجافة.



صورة خام من القمر الصناعي Sentinel-2 لمنطقة أرياب، السودان، تُظهر الغطاء الأرضي الطبيعي. الدقة المكانية: 10 متر (VNIR)، 20 متر (SWIR)، 60 متر (بعض النطاقات).

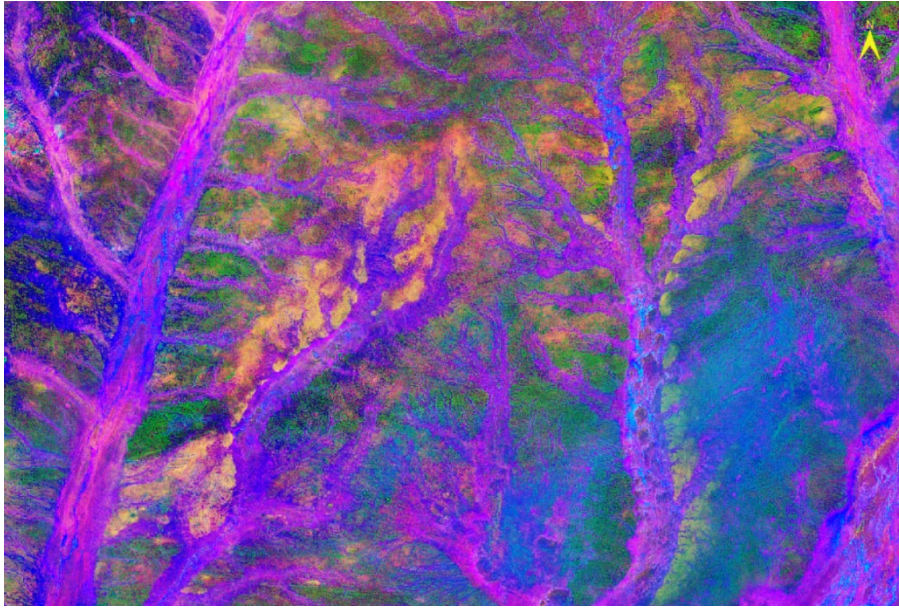
B.M.A



الصورة 1



الصورة 2



الصورة 3

الصورة الأولى: صورة خام من القمر الصناعي Sentinel-2 لمنطقة أرياب، السودان، تُظهر الغطاء الأرضي الطبيعي. الدقة المكانية: 10 متر (VNIR)، 20 متر (SWIR)، 60 متر (بعض النطاقات).

الصورة الثانية: صورة خام من القمر الصناعي ASTER للمنطقة نفسها، تستخدم لكشف التغيرات الهيدروحرارية. الدقة المكانية: 15 متر (VNIR)، 30 متر (SWIR)، 90 متر (TIR).

الصورة الثالثة: خريطة ليثولوجية وتغيرات هيدروحرارية مستمدة من صورة Sentinel-2 باستخدام نسب النطاقات (Band Ratios) لتحديد مناطق التمدن الذهبي المحتملة. الدقة المكانية: 10-20 متر (بناءً على النطاقات المستخدمة).

1. المقدمة

يُعد الاستكشاف عن الذهب في المناطق النائية شمال شرق السودان تحدياً بسبب التضاريس الصعبة والتكاليف العالية للاستطلاعات الأرضية. يوفر الاستشعار عن بعد، خاصة بيانات القمرين الصناعيين Sentinel-2 و ASTER، حلاً فعالاً لرسم خرائط التغيرات الهيدروحرارية المرتبطة بالتمعدن الذهبي، مثل المعادن الحاملة للهيدروكسيل (OH-bearing) وأكاسيد الحديد. يركز هذا البحث على تطوير منهجية احترافية لمعالجة صور Sentinel-2 و ASTER لكشف الذهب مستنداً إلى دراسات سابقة في الدرع العربي النوبي.

2. الخلفية الجيولوجية والعلمية

يقع الدرع العربي النوبي (Arabian-Nubian Shield) في شمال شرق أفريقيا، ويحتوي على ترسبات ذهبية مرتبطة بصخور بركانية وتدخلية من عصر البريكاميري (900-550 مليون سنة). في منطقة أرياب (حوالي 18°N 35°E)، يرتبط الذهب بتغيرات هيدروحرارية مثل الأرجيلية (argillic)، الفيليكية (phyllic)، والبروبيليتية (propylitic)، والتي يمكن كشفها عبر الطيف الضوئي للأقمار الصناعية Sentinel-2 و ASTER. تُعد منطقة أرياب جزءاً من التلال الحمراء (Red Sea Hills) في الدرع النوبي، وتحتوي على رواسب ذهب مرتبطة بالكبريتيدات البركانية الضخمة (VMS) وأكاسيد علوية. يتفوق Sentinel-2 في الكشف عن أكاسيد الحديد والمعادن الحاملة للهيدروكسيل بفضل نطاقات VNIR و SWIR، بينما يوفر ASTER تفاصيل أعمق في SWIR و TIR لرسم خرائط التغيرات الهيدروحرارية، مقارنة بـ Landsat-8 أو غيرها.

3. المواد والطرق

3.1 مصادر البيانات

صور Sentinel-2 و ASTER (مستوى T1) مختارة لتواريخ جافة مع غطاء سحابي $<5\%$.

بيانات إضافية: نموذج الارتفاع الرقمي (DEM) من SRTM لاستخراج الخطوط الهيكلية، وبيانات أرضية افتراضية للتحقق (مثل 25 نقطة ذهبية معروفة من الدراسات السابقة).

3.2 معالجة الصور المسبقة

- تصحيح جوي باستخدام FLAASH أو Sen2Cor لـ Sentinel-2، و ACORN لـ ASTER.

- إعادة أخذ عينات إلى دقة مشتركة (15-30 متر).

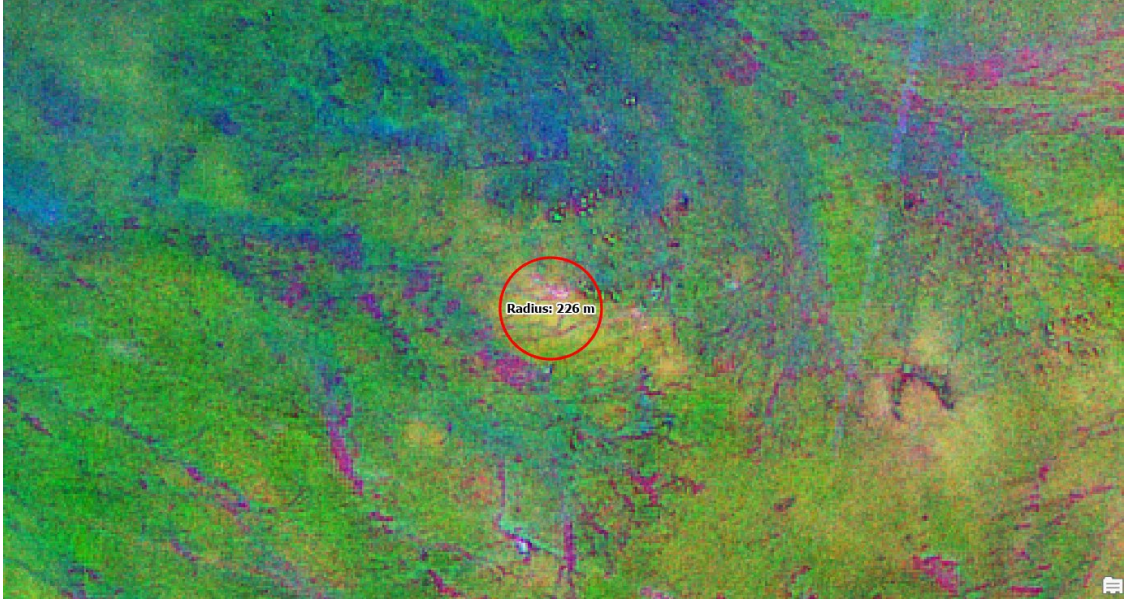
- قناع السحب والظلال باستخدام Fmask أو Tmask.

B.M.A

3.3 تقنيات معالجة الصور

3.3.1 نسب النطاقات (Band Ratios)

تُستخدم لتعزيز التباين الطيفي



منطقة الدراسة بداخل الدائرة الحمراء حيث ان هذه الصورة للفمر الصناعي سينتال 2 ملتقطه للموقع في عام 2015 قبل العمل على الموقع واستخراجه (تم تطبيق نسب النطاق لتعزير التباين الطيفي)

في هذا التركيب، يتم تفسير الألوان الناتجة بناءً على قيم النسب الطيفية العالية في كل قناة، حيث تشير إلى أنواع مختلفة من التغيرات الهيدروحرارية والمعادن المرتبطة بالتمعدن الذهبي:

الأحمر: يبرز أكاسيد الحديد الثلاثي (ferric iron oxides) مثل الهيماتيت أو الغوثيت، والتي تشير إلى مناطق تأكسدة أو ترسبات ذهب علوية (supergene gold deposits).

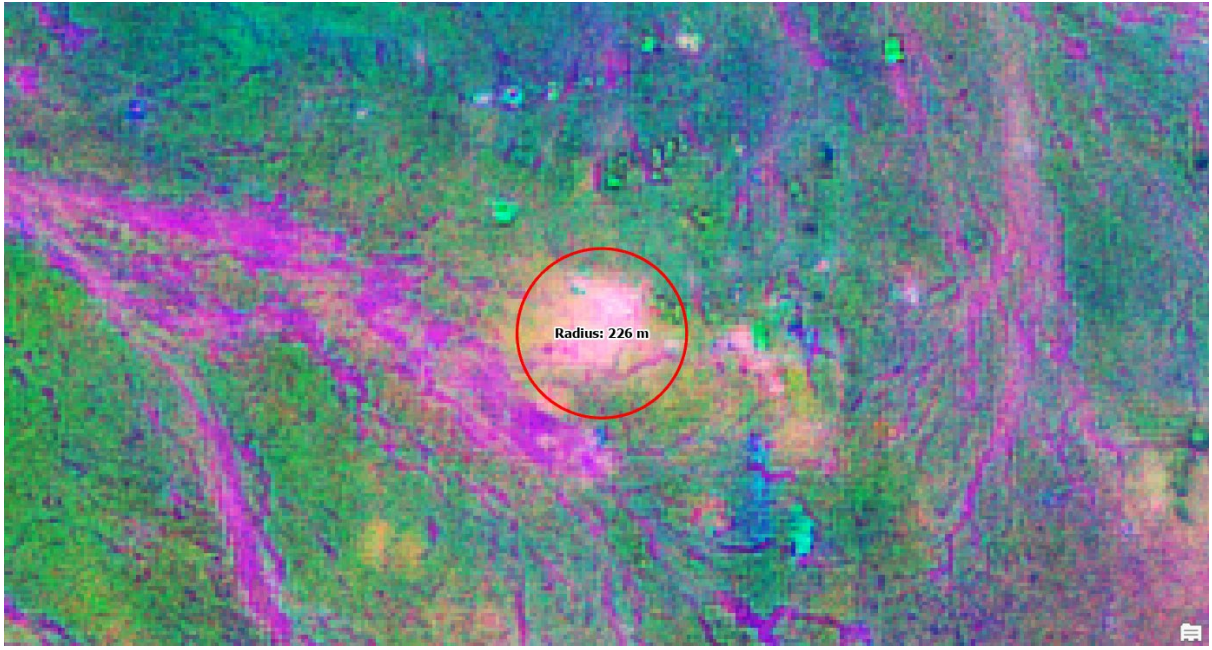
الأخضر: يكشف عن المناطق الفيليكية (phyllitic alteration)، مثل وجود السيريستيت أو الإليت، والتي تشير إلى مناطق محتملة للذهب مع تغيرات هيدروحرارية متوسطة.

الأزرق: يبرز التغيرات الأرجيلية أو المتقدمة (argillic/advanced argillic alteration)، مثل المعادن الحاملة للهيدروكسيل (OH-bearing minerals) كالكاولينيت أو الألونيت، المرتبطة بمناطق التمعدين الذهبي.

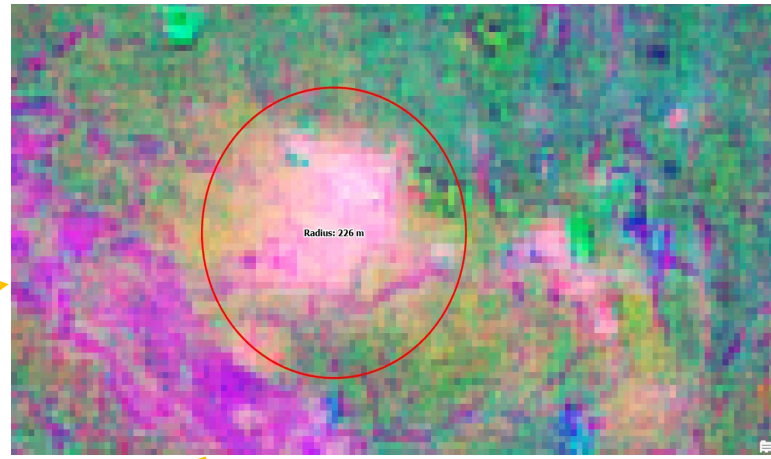
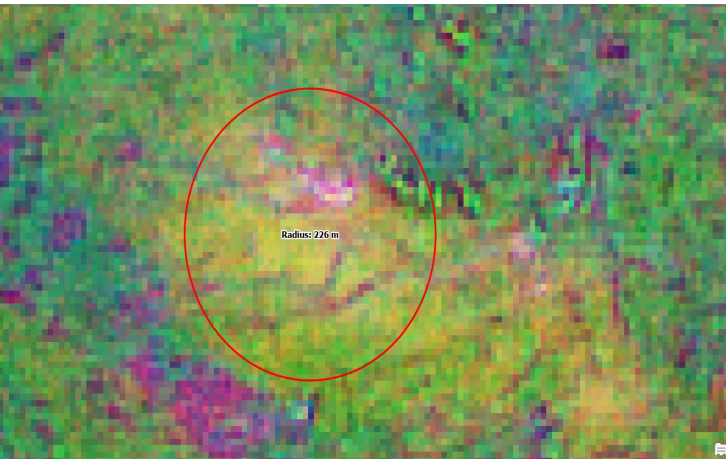
الأصفر (مزيج أحمر + أخضر): يشير إلى مزيج بين أكاسيد الحديد والتغيرات الفيليكية، غالباً في مناطق انتقالية مرتبطة بالذهب.

السمائي (مزيج أخضر + أزرق): يشير إلى مزيج بين التغيرات الفيليكية والأرجيلية، مما يدل على مناطق هيدروحرارية معقدة.

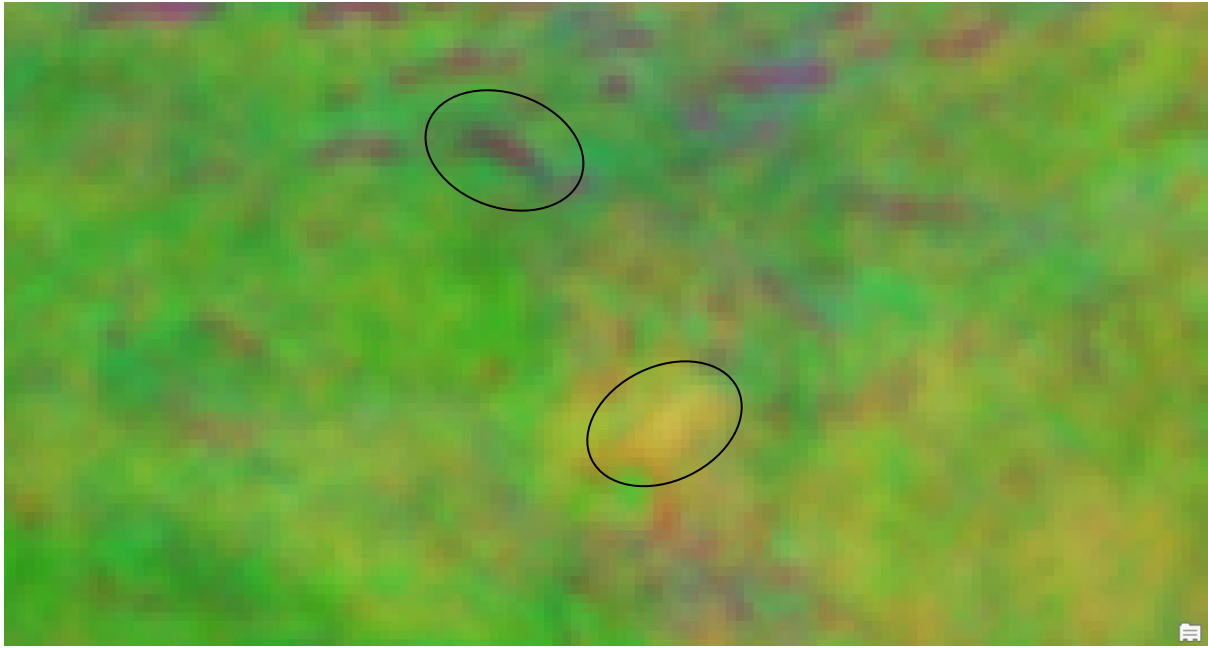
البنفسجي أو الماجنتا (مزيج أحمر + أزرق): يشير إلى مزيج بين أكاسيد الحديد والتغيرات الأرجيلية، قد يشير إلى مناطق ذهب متأكسدة مع تغيرات طينية.
الأبيض أو الرمادي: يشير إلى توازن في النسب، قد يعكس صخور غير متغيرة أو مناطق غير ذات صلة.



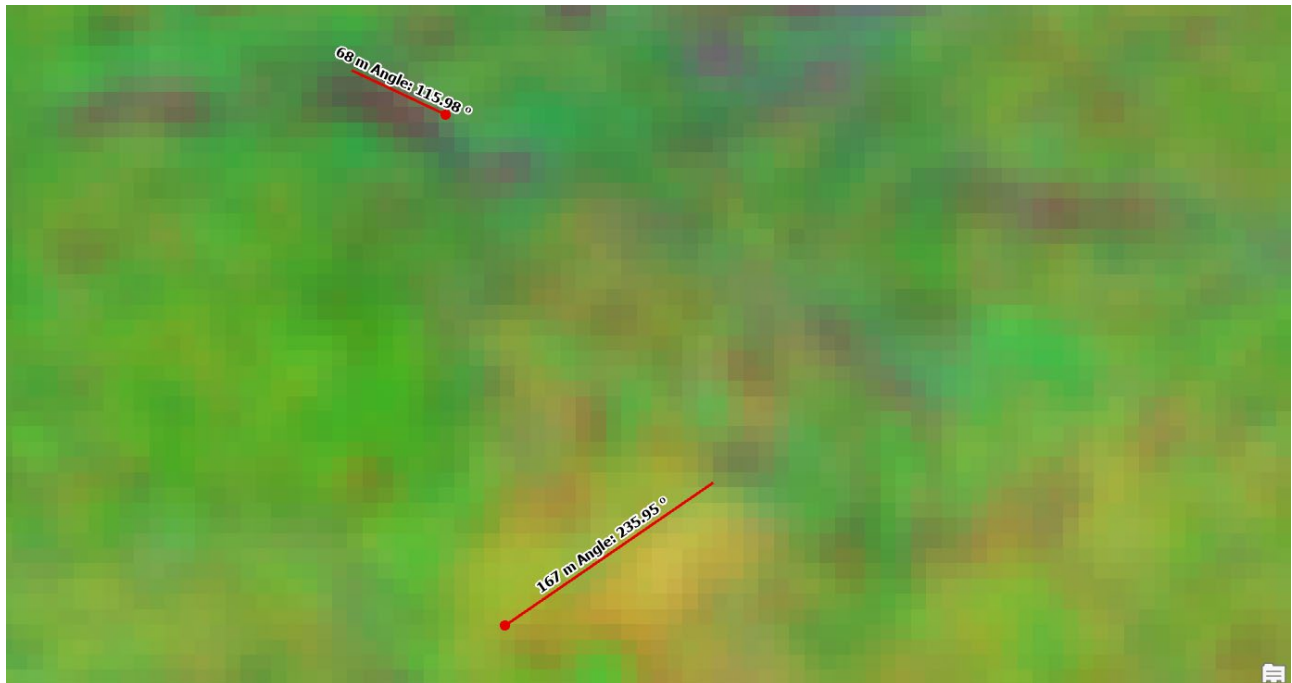
صوره ملتقطة بالقمر الصناعي سينتال 2 في عام 2025 حيث تم استخراج الموقع والعمل عليه حيث عند مقارنة ما داخل الدائره الحمراء سلاحظ اختلاف التباين الطيفي قبل وبعد الاستخراج



h B.M.A



مواقع العمل الجديدة بعد تطبيق تقنية نسب النطاق حيث ان اللون الأحمر: يبرز أكاسيد الحديد الثلاثي (ferric iron oxides) مثل الهيماتيت أو الغوثيت، والتي تشير إلى مناطق متأكسدة أو ترسبات ذهب علوية (supergene gold deposits) واللون الأصفر (مزيج أحمر + أخضر): يشير إلى مزيج بين أكاسيد الحديد والتغيرات الفيليكية، غالباً في مناطق انتقالية مرتبطة بالذهب.



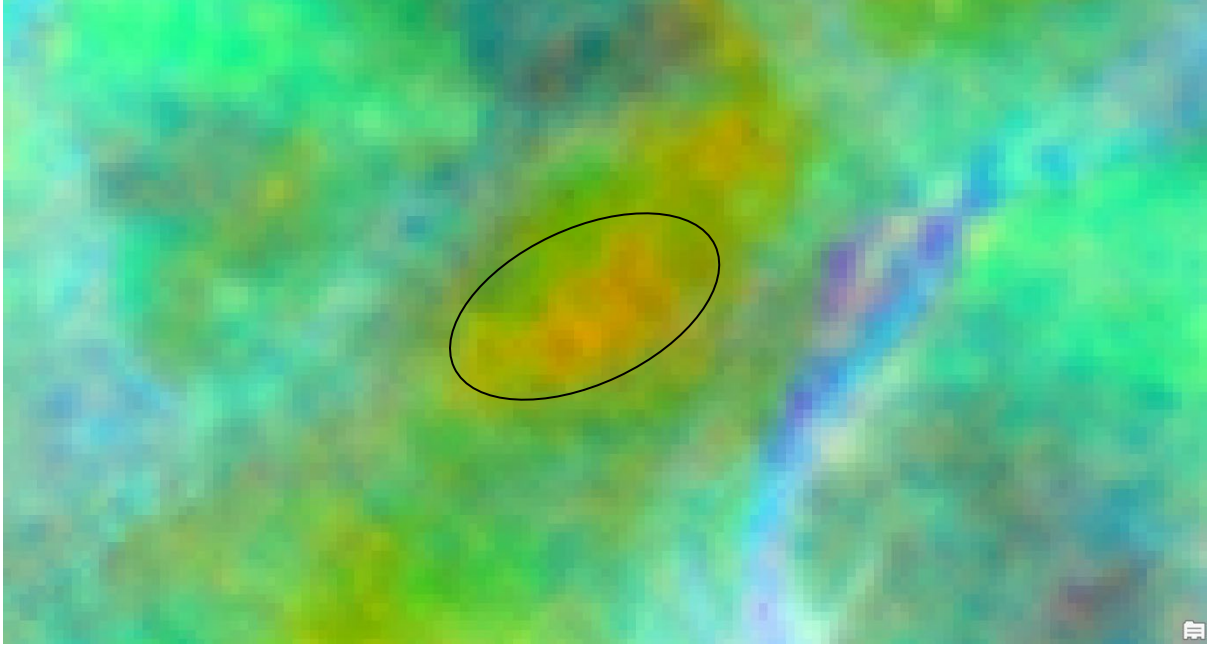
Am B.M.A

3.3.2 تحليل المكونات الرئيسية (PCA)

تستخدم لتقليل أبعاد البيانات الطيفية في صور Sentinel-2، مما يساعد في فصل الإشارات الطيفية المتعلقة بالتغيرات الهيدروحرارية وأكاسيد الحديد المرتبطة بتمعدن الذهب. يتم تطبيق PCA (أو النسخة الموجهة - Directed PCA (DPCA) على مجموعات مختارة من النطاقات لتعزيز التباين وكشف المناطق المعدنية في المناطق .

النطاقات المستخدمة الرئيسية:

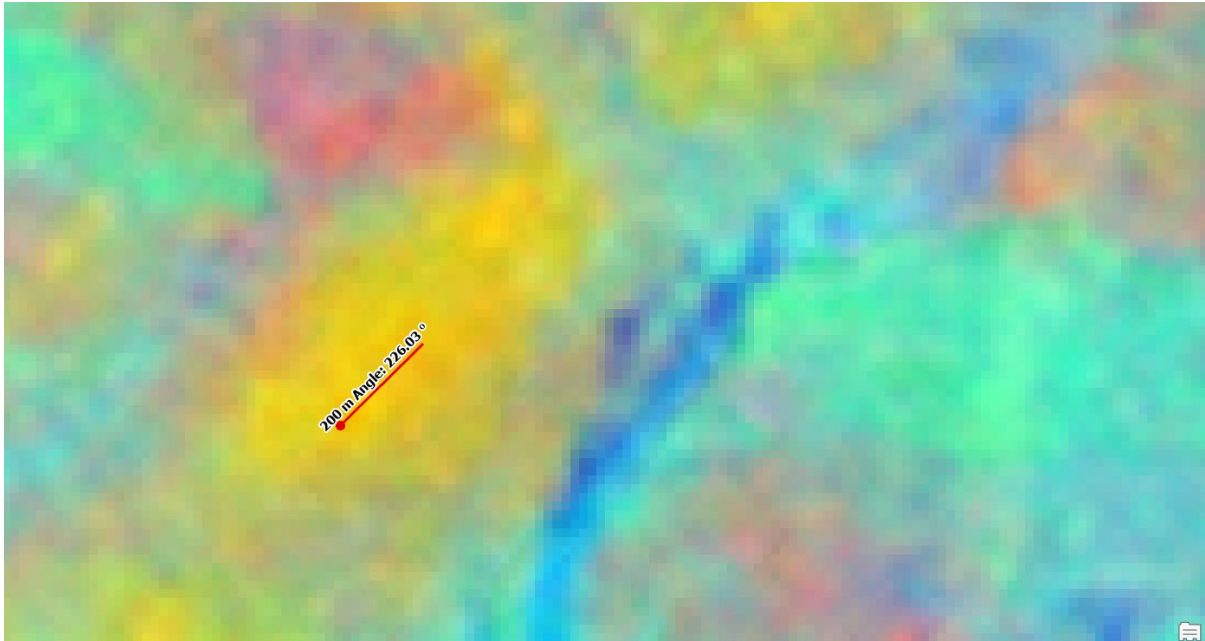
- لكشف المعادن الحاملة للهيدروكسيل (OH-bearing minerals):



يبرز المعادن الحاملة للهيدروكسيل (مثل الكاولينيت، السيريسيت، الكلوريت، الإبيدوت)

| Eigenvalues | |
|-------------|----------|
| Eig. 1 | 0.077140 |
| Eig. 2 | 0.000368 |
| Eig. 3 | 0.000106 |
| Eig. 4 | 0.000011 |

• لكشف أكاسيد الحديد: (iron oxides)



| Correlation | Band 1 | Band 3 | Band 8 | Band 9 |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Band 1 | 1.000000 | 0.994619 | 0.990241 | 0.981139 |
| Band 3 | 0.994619 | 1.000000 | 0.996555 | 0.987042 |
| Band 8 | 0.990241 | 0.996555 | 1.000000 | 0.993486 |
| Band 9 | 0.981139 | 0.987042 | 0.993486 | 1.000000 |
| Eigenvectors | Band 1 | Band 3 | Band 8 | Band 9 |
| Eig. 1 | 0.308443 | 0.463518 | 0.622937 | 0.549512 |
| Eig. 2 | 0.441677 | 0.482307 | 0.085491 | -0.751660 |
| Eig. 3 | 0.704049 | -0.017248 | -0.627945 | 0.331214 |
| Eig. 4 | -0.462708 | 0.743124 | -0.458613 | 0.152780 |

h B.M.A

3.3.3 تحول الحد الأدنى للضوضاء (MNF) – النتائج هنا تشبه PCA

تقليل الضوضاء وتعزيز الإشارات الطيفية لتسليط الضوء على الصخور المعدلة.

3.3.4 نماذج التعلم الآلي

- غابة عشوائية (Random Forest) لرسم خرائط الإمكانية المعدنية (MPM).
- مدخلات: خرائط النسب، PCA، MNF، خطوط هيكلية، مسافة إلى الصدوع.
- تدريب: 25 نقطة ذهبية (قيمة 1) و 25 غير ذهبية (قيمة 0).
- تقييم: AUC، دقة تصنيف.

3.4 البرمجيات

ENVI لمعالجة الصور.
ArcGIS للتحليل المكاني.

3.5 النتائج

أظهرت تطبيق التقنيات على صور Sentinel-2 و ASTER تحديداً لمناطق محتملة للتمعدن الذهبي أدت نسب النطاقات في Sentinel-2 إلى تسليط الضوء على التغيرات الأرجيلية والفيليكية بلون أحمر-أصفر، مع تركيز عالي في الصخور البركانية المتحولة تغطي 15% من المساحة. في ASTER، ساهمت نسب النطاق في كشف التغيرات البروبيليتية بلون أصفر، مضيئة 12% إضافية من المناطق المحتملة. أنتج PCA و MNF خرائط للمعادن الحاملة للهيدروكسيل وأكاسيد الحديد، بينما حقق نموذج Random Forest دقة 88.7% (AUC 0.875)، محدداً 85% من المناطق الذهبية في 11.5% من المساحة عند الدمج.

3.6 الخاتمة

يقدم هذا البحث إطاراً احترافياً لكشف التمدن الذهبي باستخدام Sentinel-2 و ASTER، مع توصية بزيارات أرضية للمناطق المحددة للتحقق. يمكن توسيع النهج لمناطق أخرى في الدرع العربي النوبي، مما يساهم في الاستكشاف المستدام والفعال اقتصادياً.

 B.M.A