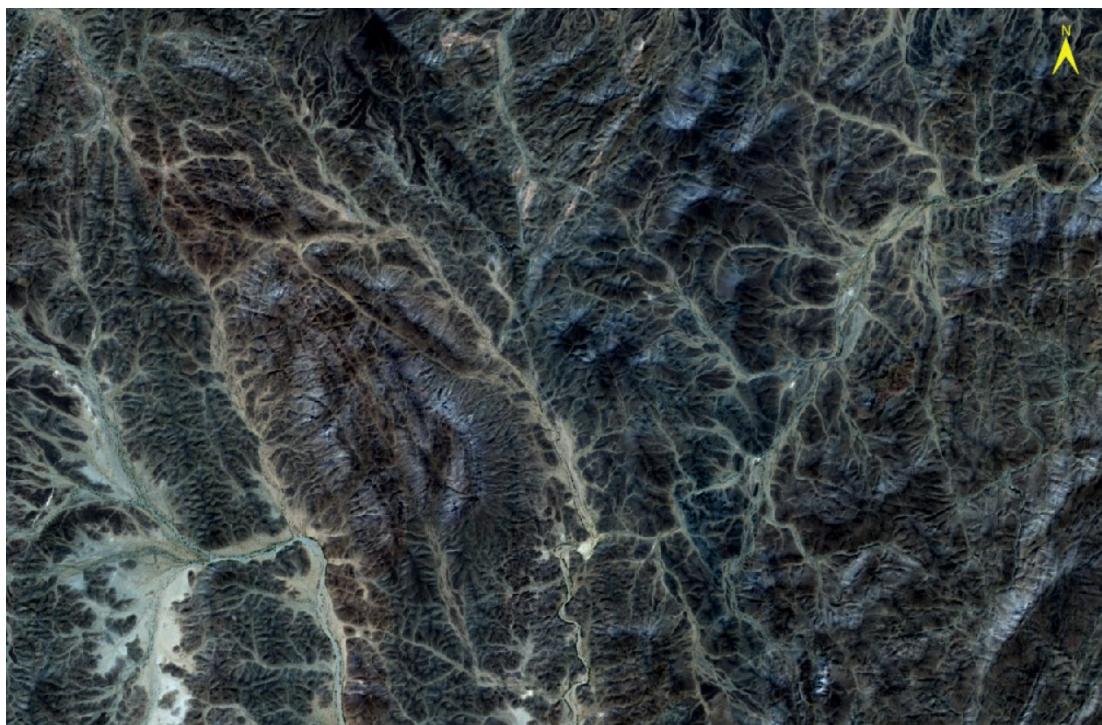


المقدمة

يُقدم هذا التقرير نتائج تحليل صور الأقمار الصناعية Sentinel-2 لتقدير إمكانيات وجود تربسات الذهب الخام في الإحداثيات 43.421785, 19.646140، الواقعة ضمن منطقة Asir terrane في الدرع العربي جنوب غرب المملكة العربية السعودية. يعتمد التحليل على تقنيات معالجة البيانات الطيفية المثبتة لكشف التغيرات الحرارية المائية، مثل أكسيد الحديد والمعادن الحاملة للهيدروكسيل، لدعم عمليات الاستكشاف التجاري للشركات. كما أظهرت دراسة منجم Al-Hajar القريب جغرافياً (حوالي 100 كم جنوباً) فعالية هذه الطرق في تحديد موقع ذهب جديدة، مع التحقق الميداني الذي أدى إلى استغلال تجاري ناجح، مما يوفر أساساً موثقاً لتوصيات الاستثمار في المنطقة المستهدفة. كذلك، أكدت دراسات أخرى في الدرع العربي نجاح Sentinel-2 في رسم خرائط الخامات باستخدام نسب النطاقات، مما يعزز الكشف عن الغوسان والتغيرات الطينية المرتبطة بالذهب، مع دمج PCA وMNF لتحقيق دقة تصنيف تصل إلى 85% في المناطق المجاورة.



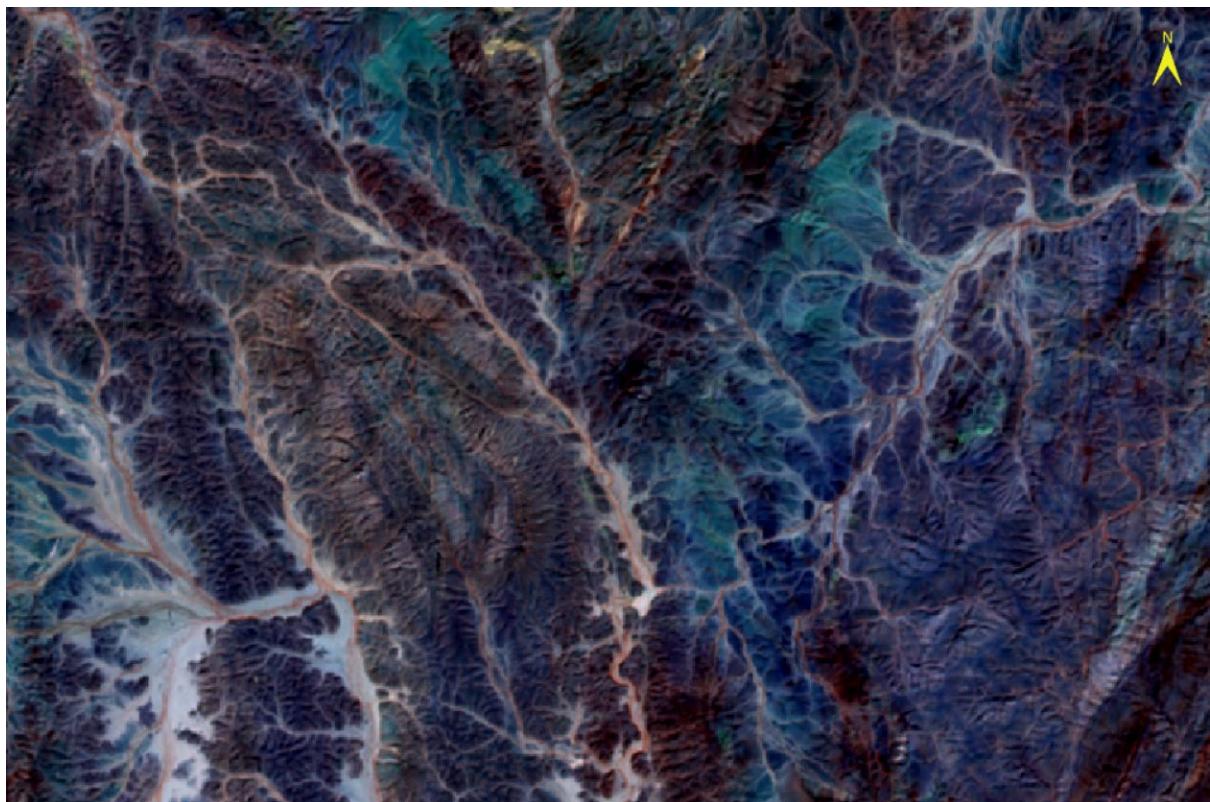
الصورة 1 : تركيب ألوان طبيعي لصورة Sentinel-2 (نطاقات 4-3-2) يعرض النباتات، تمييز التربة، والميزات الأرضية في منطقة الدراسة لتقدير الاحتمالية الأولية للذهب

2. وصف المنطقة الدراسة

2.1 الوصف الجيولوجي

تقع منطقة الدراسة ضمن منطقة Asir terrane في الدرع العربي جنوب غرب المملكة العربية السعودية، وهي جزء من تكتلات نيوبرونتيروزويكية تشمل صخوراً بركانية رسوبية متولدة وغراينيتية، مع خطوط صدع وتغيرات حرارية مائية مرتبطة بترسبات الذهب والمعادن الأساسية. تشبه المنطقة جيولوجياً منطقة Khnaiguiyah (حوالي 300 كم شمالاً)، حيث أظهرت الدراسات استخدام Sentinel-2 لرسم خرائط التغيرات مثل argillic (كلولينيت، مونتموريولينيت) وphyllitic (موسكونيت، إليت)، المرتبطة بترسبات Zn-Cu-Au VMS في بيئات goossans، مع التركيز على كمؤشرات سطحية للخامات.

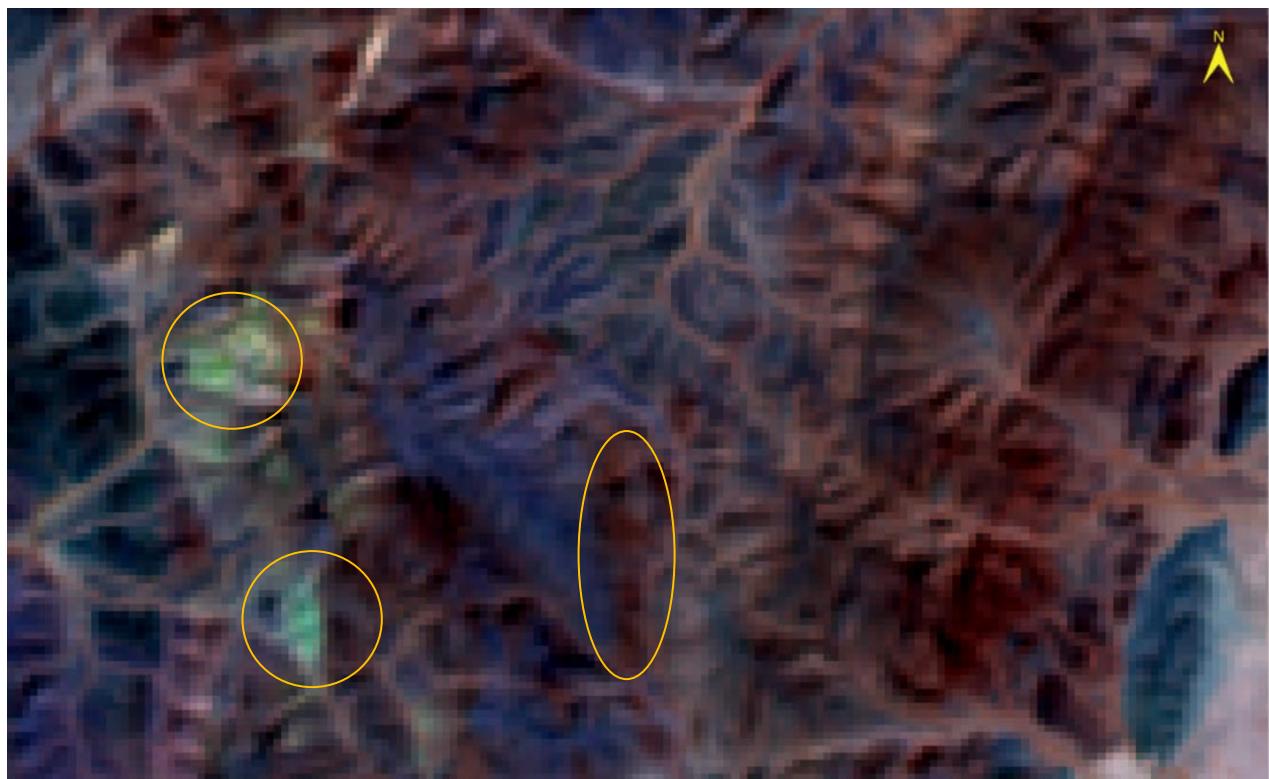
 A handwritten signature in black ink, appearing to read "Ahmed B.M.A".



الصورة 2 : تركيب ألوان عكسية لصورة Sentinel-2 يبرز مناطق التغيرات الحرارية المائية، مثل المعادن الحاملة للهيدروكسيل وأكسيد الحديد، لكشف الذهب المستهدف في استكشاف المعادن.

تبرز الألوان الناتجة المعادن المتغيرة حراريًا المائية المرتبطة بترسبات الذهب من خلال استغلال سمات الامتصاص الطيفي. بناءً على دراسات في الدرع العربي النبوي، مثل منطقة جبل الرخام-جبل معيلحة (مصر)، يعزز هذا الدمج كشف المعادن الحاملة للهيدروكسيل (Fe-OH ، Mg-OH ، Al-OH) وأكسيد الحديد في الصخور المتحولة والسرپنتينية، حيث تظهر المناطق المتغيرة بألوان مميزة بسبب الامتصاص في SWIR (مثل Al-OH عند ~ 2.2 ميكرومتر في B12، Mg-OH عند ~ 1.6 ميكرومتر في B11، والانعكاس في NIR في B8a).

 B.M.A



التفسير

امتصاص عالي في (B11) SWIR1، مشيراً إلى معادن Mg-OH/Fe-OH (مثل الكلوريت، الإبيدوت) في التغيرات *propylitic*؛ غالباً محيطية لمعدن الذهب في مناطق الصدع

اللون في الصورة

أحمر إلى أرجواني

استجابة قوية في (B12) SWIR2، تبرز معادن Al-OH (مثل الكاولينيت، السيريسيت) في المناطق *argillic/phyllic*؛ مدوم ميدانياً كاحتمالية عالية للذهب الأوروجيني في مساحات $\sim 240 \text{ كم}^2$

أخضر إلى أصفر

انعكاس (B8a) NIR سائد، يمثل النباتات غير المتغيرة أو الصخور الطازجة؛ احتمالية تغيير منخفضة.

أزرق إلى سماوي

3. البيانات والطرق

3.1 البيانات

صور **Sentinel-2**: مستوى LL2A، مع نطاقات طيفية عالية الدقة (20-10 م) في VIS/NIR/SWIR، لرسم خرائط التغيرات الحرارية.

برنامج المعالجة: ENVI 5.6 لمعالجة الطيفية وإنشاء الخرائط. بالإضافة إلى برنامج PCI Geomatics ARC MAP و معالجة أولية: تصحيح جوي بـ FLAASH، إعادة أخذ عينات إلى 20 م، وتقليل الضوضاء لتعزيز التباين في المناطق الجبلية الوعرة.

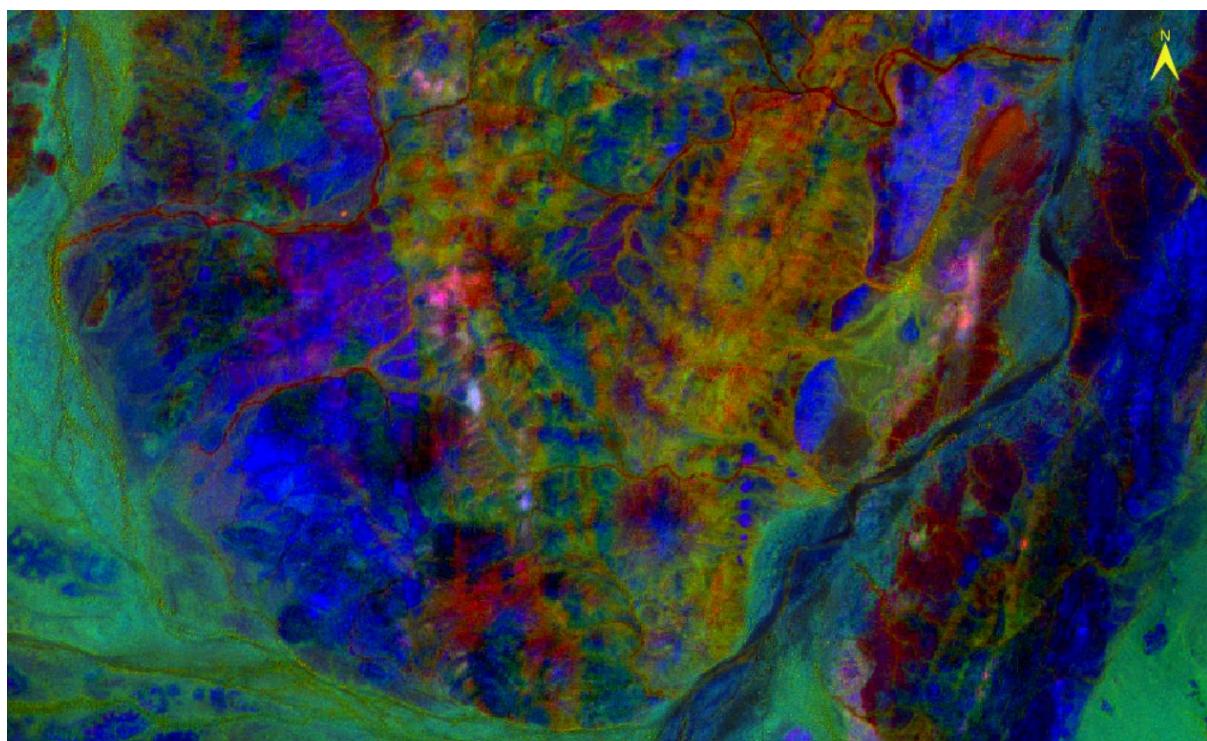
3.2 تقييمات التحسين

بناءً على الدراسة للمنطقة يُنصح بتطبيق نسب النطاقات (Band Ratios) على Sentinel-2 لكشف التغيرات، مع دمج PCA لتعزيز التمييز الطيفي، كالتالي:

3.2.1 نسب النطاقات (Band Ratios)

استخدمت لتعزيز السمات الطيفية وتقليل التأثيرات الطبوغرافية:

يمكن عرضها كتركيب (Iron oxides) RGB: R (OH-bearing), G (Iron oxides), B (Ferric oxides)، حيث تظهر المناطق المغيرة بلون أرجواني أو أصفر، كما أدى ذلك إلى تحديد 2.59% من المساحة كـ "excellent" للمعادن الحرارية.

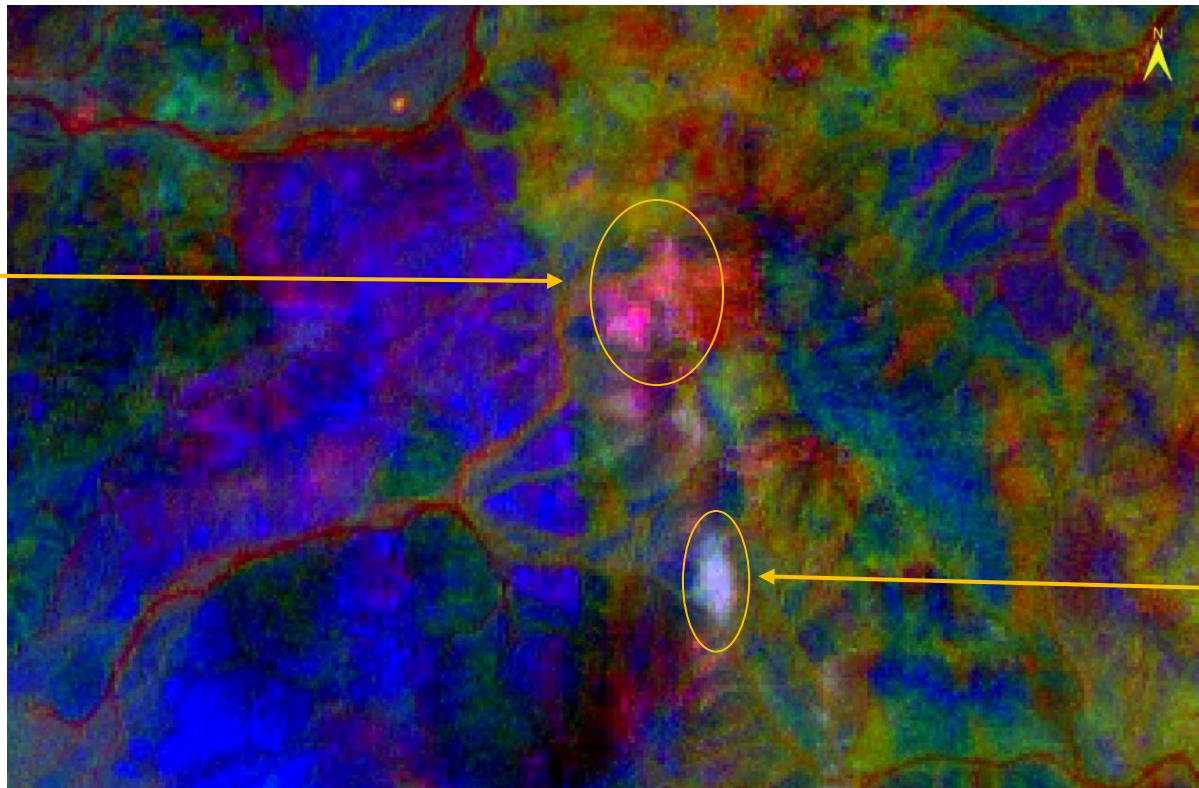


B.M.A

تركيب RGB لنسب نطاقات Sentinel-2 (للمعادن الحاملة لـ OH ، لأكسيد الحديد ، لأكسيد الحديد الثلاثي) يبرز مناطق التغيرات الحرارية المائية لاستكشاف الذهب في منطقة الدراسة

3.2.2

تفسير الألوان الرئيسية والتدخلات: استخدم جدول الألوان أدناه، المستمد من الدراسة المذكورة، حيث تم التحقق ميدانياً من أن التدخلات (مثل الأرجواني أو الأصفر) تشير إلى مناطق التغيرات المرتبطة بالذهب



الارتباط بالذهب

احتمالية عالية؛ غالباً محيطية لعرق الذهب في مناطق الصدع، حيث أكدت العينات الميدانية شذوذات Au في هذه البقع.

مؤشر جيد؛ يشير إلى غوسان سطحي فوق خامات الذهب، مع تأكيد في مساحات ~ 240 كم² كمناطق استكشاف واعدة.

احتمالية متوسطة؛ مرتبطة بتاكسد سطحي، لكن يحتاج دمج مع ألوان أخرى لتأكيد الذهب.

احتمالية متوسطة؛ مرتبطة بتاكسد سطحي، لكن يحتاج دمج مع ألوان أخرى لتأكيد عالية، أكدت الدراسات وجود Au في ~ 136 كم² من هذه المناطق.

التفسير الطيفي والجيولوجي

سيطرة (OH-bearing) R مع تداخل B (ferric oxides)؛ يشير إلى معادن Al-OH/Fe,Mg-OH والكلوريت في تغيرات phyllitic/propylitic.

سيطرة (iron oxides) G مع تداخل (OH-bearing) Fe-OH المختلطة.

سيطرة (ferric oxides) B ؛ حديد ثلاثي نقى مثل الهيماتيت.

تدخل كامل لجميع القنوات؛ مزيج من

اللون في الصورة

أحمر قوي إلى أرجواني

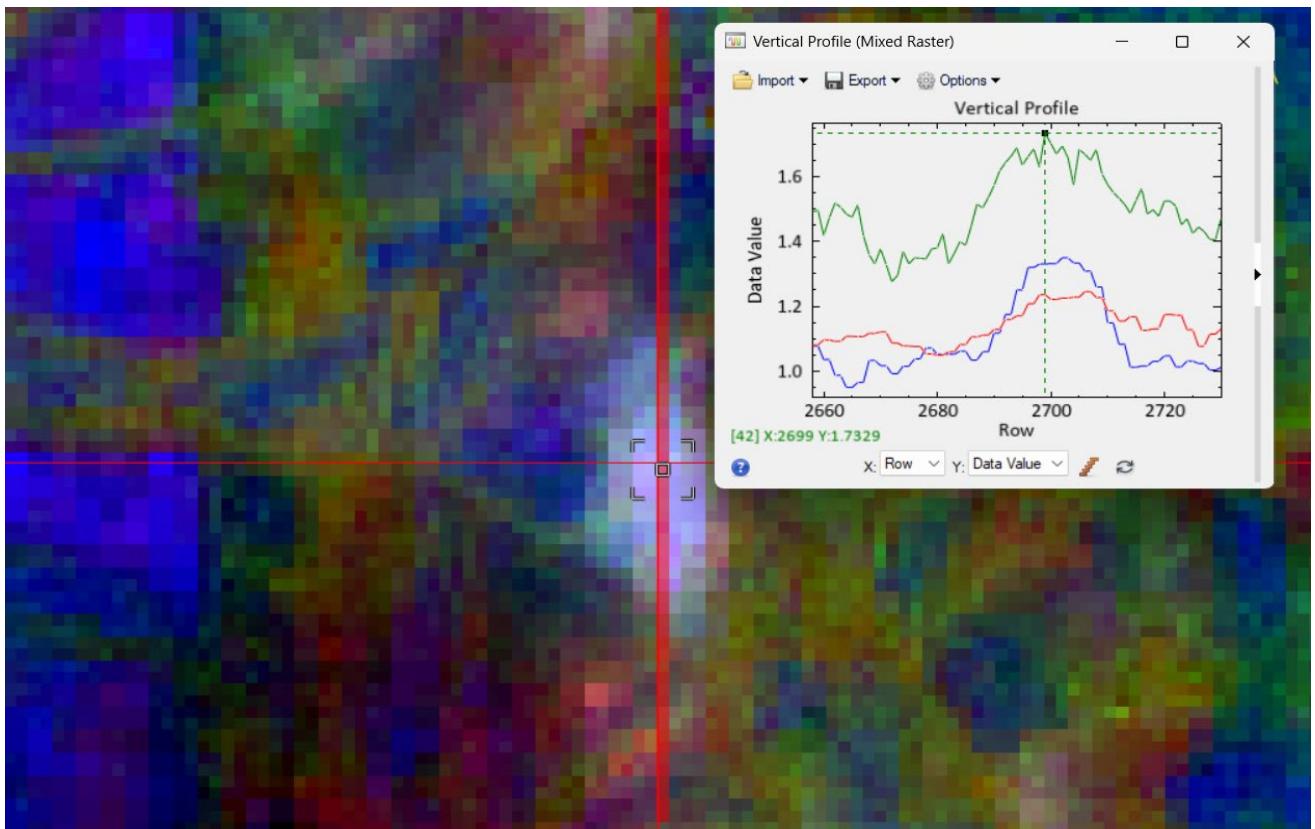
أخضر إلى أصفر

أزرق إلى سماوي

أبيض/فاتح

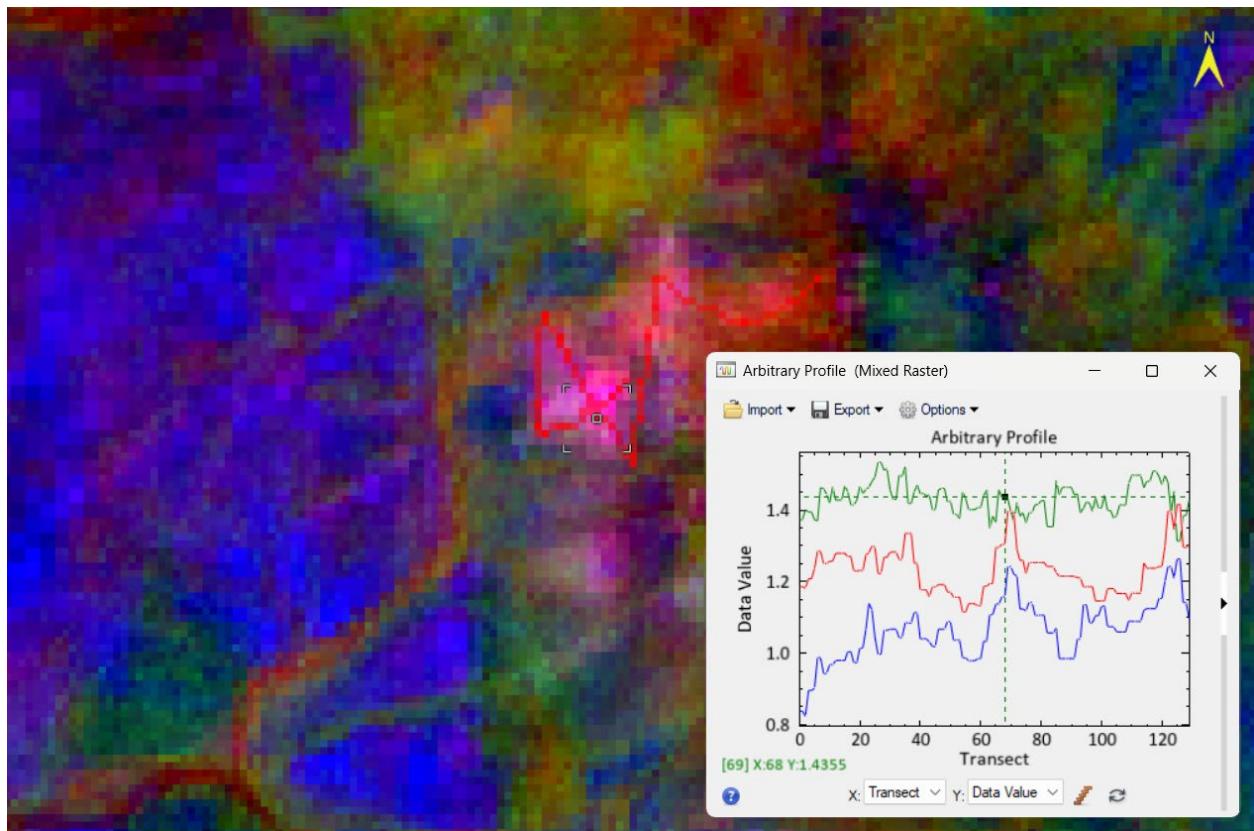
H.B.M.A

الحديد والـ OH (غوسان مختلط).



يفحص هذا البروفايل الرأسي البكسلات البيضاء في الترکيب RGB لنسب النطاقات، مع خط عبور رأسي عبر المناطق عالية القيمة. يعرض الرسم قيم البيانات (المحور ~ 1.0 - ~ 1.6) على طول الصفوف (~ 2720 وحدة)، حيث يصل الخط الأخضر (OH-bearing) إلى قمة حادة عند الصف 2699، يبقى الخط الأحمر (أكسيد الحديد) مستقرًا، ويقلب الخط الأزرق (نسبة ferric) منخفضاً، مشيرًا إلى تداخل كامل للقتوات في الدرجات البيضاء (أكسيد حديد مختلطة وهيدروكسيل مثل الغوسان). يشير هذا إلى مناطق تغيرات مخلطة عالية الاحتمالية للذهب. وفقاً لدراسات موثقة في أراضٍ مشابهة، يوصى بمسوح جيوفيزائية (مثل المغناطيسية) وحفر نواة إلى 80-100 م في قم البكسلات البيضاء لاستهداف تربات Au المرتبطة بالسلفابيد.

B.M.A



يحل هذا البروفايل البكسلات الحمراء والأرجوانية في التركيب RGB لنسب النطاقات (R لـ OH-bearing، G لأكسيد الحديد، B لأكسيد الحديد الثلاثي)، مع خط عبور يمر بهذه المناطق. يظهر الرسم قيم البيانات (المحور Y ~0.8-1.4) على طول الخط (~120 وحدة)، حيث ينخفض الخط الأزرق (نسبة ferric) منخفضاً، يتقلب الخط الأحمر (أكسيد الحديد) متوسطاً، ويصل الخط الأخضر (OH-bearing) إلى قمة حول الخط 60، مشيراً إلى إشارات هيدروكسيل قوية في المناطق الأرجوانية (معدن Al-OH مثل السيريسيت). يشير هذا إلى تغيرات phyllitic، مع تسلیط المؤشر على انتقال إلى مناطق عالية الاحتمالية للذهب. بناءً على دراسات مدعومة ميدانياً في الدرع العربي التوبى، يُوصى بأخذ عينات جيوكيميائية وحفر سطحي (50-20 م) في البكسلات الأرجوانية القمة لتأكيد Au في مناطق الصدع

B.M.A

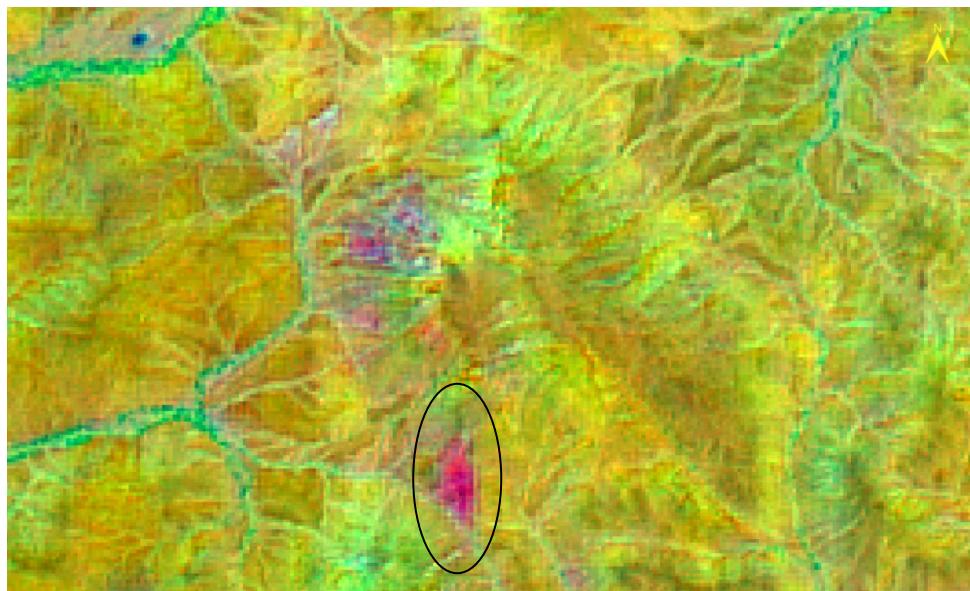
3.2.2 تحليل المكونات الرئيسية(PCA)

تحليل المكونات الرئيسية (PCA) هو طريقة إحصائية تستخدم في الاستشعار عن بعد لتحويل عدد كبير من النطاقات الطيفية المتراوحة إلى مجموعة أصغر من النطاقات غير المتراوحة، مما يقلل من الأبعاد مع الحفاظ على معظم التباين في البيانات. في استكشاف المعادن داخل الدرع العربي، كما هو موثق في دراسة Eldosouky et al. (2022) في مجلة Minerals ، يُطبق PCA على بيانات متعددة الطيف لإبراز المعادن المتغيرة حرارياً مائياً.

تحليل المكونات الرئيسية للمجموعة الأولى (اكاسيد الحديد)



Amr B.M.A



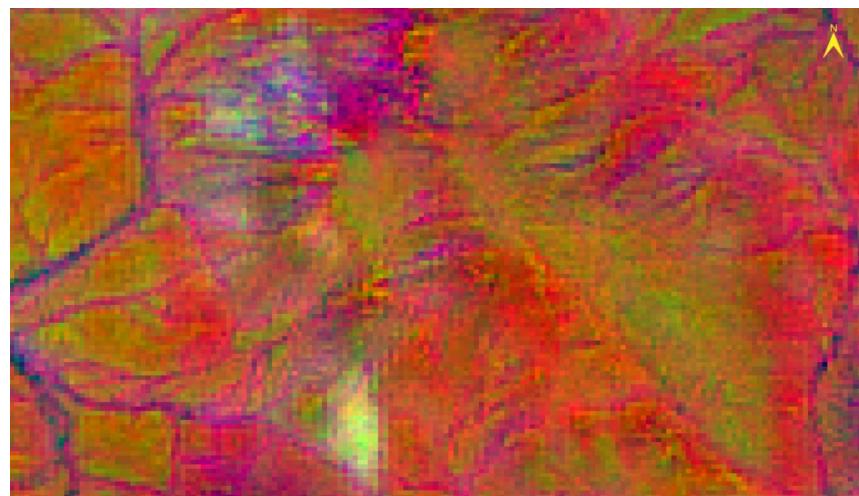
تظهر هنا اكاسيد الحديد باللون الأحمر الفاتح

Correlation	Band 1	Band 3	Band 4	Band 9
Band 1	1.00000	0.899586	0.846054	0.714067
Band 3	0.899586	1.00000	0.983742	0.908539
Band 4	0.846054	0.983742	1.00000	0.930681
Band 9	0.714067	0.908539	0.930681	1.00000
Eigenvectors	Band 1	Band 3	Band 4	Band 9
Eig. 1	0.265328	0.492832	0.612648	0.558015
Eig. 2	0.638060	0.300773	0.118271	-0.698876
Eig. 3	0.635138	-0.065871	-0.627669	0.445299
Eig. 4	-0.345081	0.813827	-0.465517	-0.043587

قيم ال Eigenvectors للمجموعة الأولى

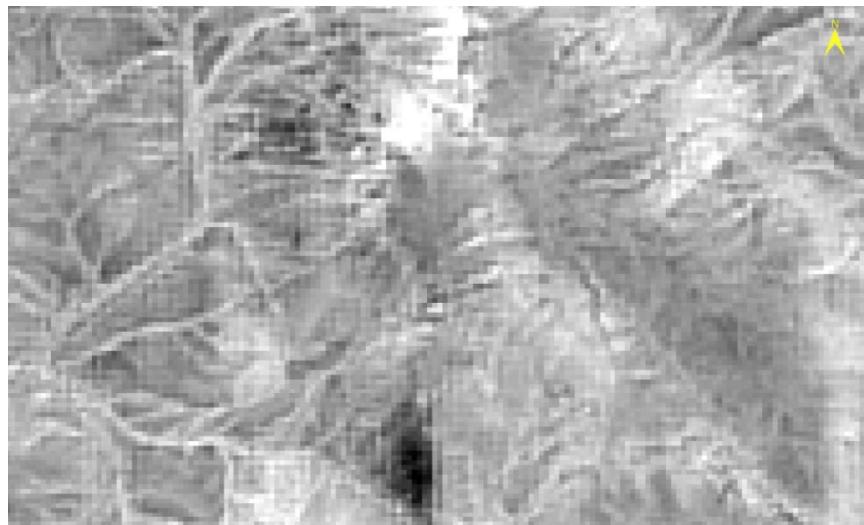
بناءً على الجدول أعلاه حيث PC2 لديه تحميل سلبي قوي على -0.6898 لامتصاص SWIR في المعادن الحاملة للهيدروكسيل OH-bearing ، و PC4 لديه تحميل إيجابي عالي على 0.8138 لاكاسيد الحديد) والمطابق لدراسات Sentinel-2 لكشف التغيرات الحرارية المائية

R (أحمر): PC4 (أكاسيد الحديد / Iron oxides) – يبرز الغوasan والتآكسد السطحي.
G (أخضر): Negated PC2 أو PC2 (معادن OH-bearing، معكوس لإبراز الامتصاص بالأبيض/الفاتح).
B (أزرق): PC1 (التباعين العام / Brightness).



هذا التركيب يجعل مناطق
التغيرات (OH phyllitic-argillic)
تنظر أرجوانية/فاتحة،
كما أكدت الدراسات في الدرع
العربي للذهب.

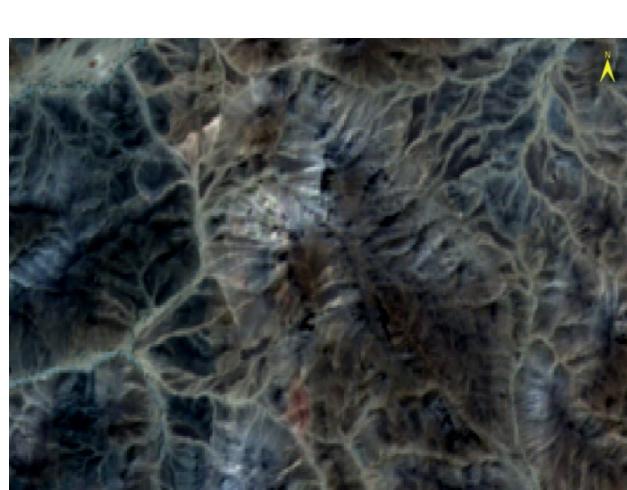
اللون الأسود يشير إلى نسبة عالية من معادن
المترتبة بالذهب OH-Minerals



تحليل المكونات الرئيسية للمجموعة الثانية
(معادن الهيدروكسيل)

Correlation	Band 1	Band 8	Band 9	Band 10
Band 1	1.000000	0.828172	0.714067	0.805896
Band 8	0.828172	1.000000	0.943428	0.949113
Band 9	0.714067	0.943428	1.000000	0.955113
Band 10	0.805896	0.949113	0.955113	1.000000
Eigenvectors	Band 1	Band 8	Band 9	Band 10
Eig. 1	0.246148	0.601308	0.546440	0.528434
Eig. 2	0.808387	0.206372	-0.549607	-0.043049
Eig. 3	0.231419	-0.704812	0.023238	0.670183
Eig. 4	0.482044	-0.314768	0.631502	-0.519383

Am B.M.A

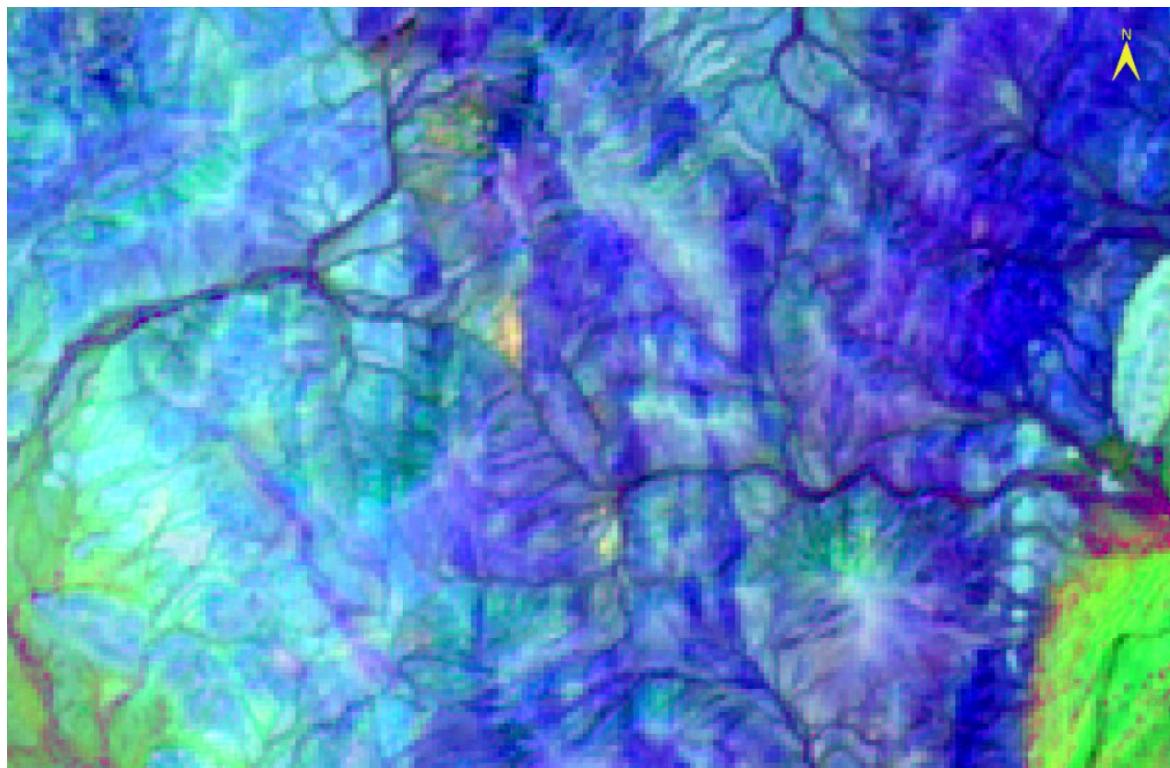


في الصورة، المناطق الوردية/الحمراء الوسطى تمثل قمم PC4 ، مشيرة إلى احتمالية عالية للمعادن OH-bearing فوق تربات الذهب، بينما الأخضر يغطي الخلفية غير المتغيرة.

تحليل المكونات الرئيسية للمجموعة الثالثة (رسم خرائط التغيرات)

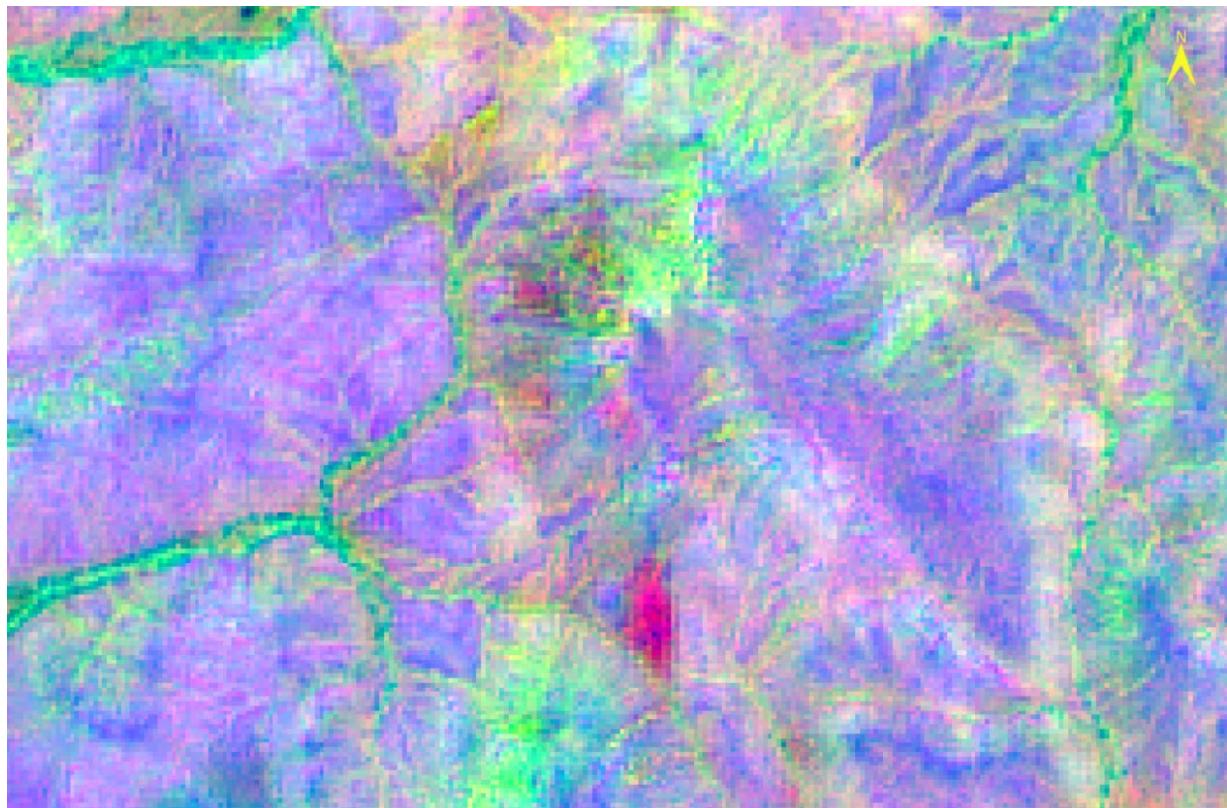
Eigenvectors	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9	Band 10
Eig. 1	-0.158922	-0.223358	-0.293203	-0.364000	-0.329840	-0.342610	-0.358817	-0.374532	-0.328663	-0.321203
Eig. 2	-0.520369	-0.484126	-0.212387	-0.046487	-0.092839	-0.031058	0.011339	0.071936	0.608403	0.250054
Eig. 3	0.347262	0.263246	0.065461	-0.293369	-0.069570	-0.213672	-0.273133	-0.335808	0.266796	0.640871
Eig. 4	0.184241	0.172933	0.204493	0.354039	-0.261363	-0.228346	-0.188368	-0.124519	0.573396	-0.518426
Eig. 5	0.322309	0.095933	-0.374243	-0.613359	0.203582	0.191653	0.189434	0.161137	0.334417	-0.344652
Eig. 6	0.301792	0.053956	-0.554143	0.273572	-0.506685	-0.144826	0.056879	0.447436	-0.087398	0.187929
Eig. 7	-0.034968	0.133083	-0.316843	0.215172	-0.219094	0.477782	0.352775	-0.657227	0.034820	0.022132
Eig. 8	-0.354604	0.399207	0.343056	-0.369959	-0.544513	-0.033655	0.367128	0.167012	-0.005402	-0.000333
Eig. 9	-0.468235	0.644829	-0.394677	0.126848	0.345285	-0.200232	-0.177426	0.032617	0.032208	-0.013984
Eig. 10	-0.090841	0.107392	0.042918	-0.060199	-0.218042	0.675759	-0.656661	0.198015	0.010526	-0.005684

 A handwritten signature in black ink, appearing to read "Am B.M.A".



تظهر المناطق التي تشير الى وجود الذهب باللون الأصفر

Amr B.M.A

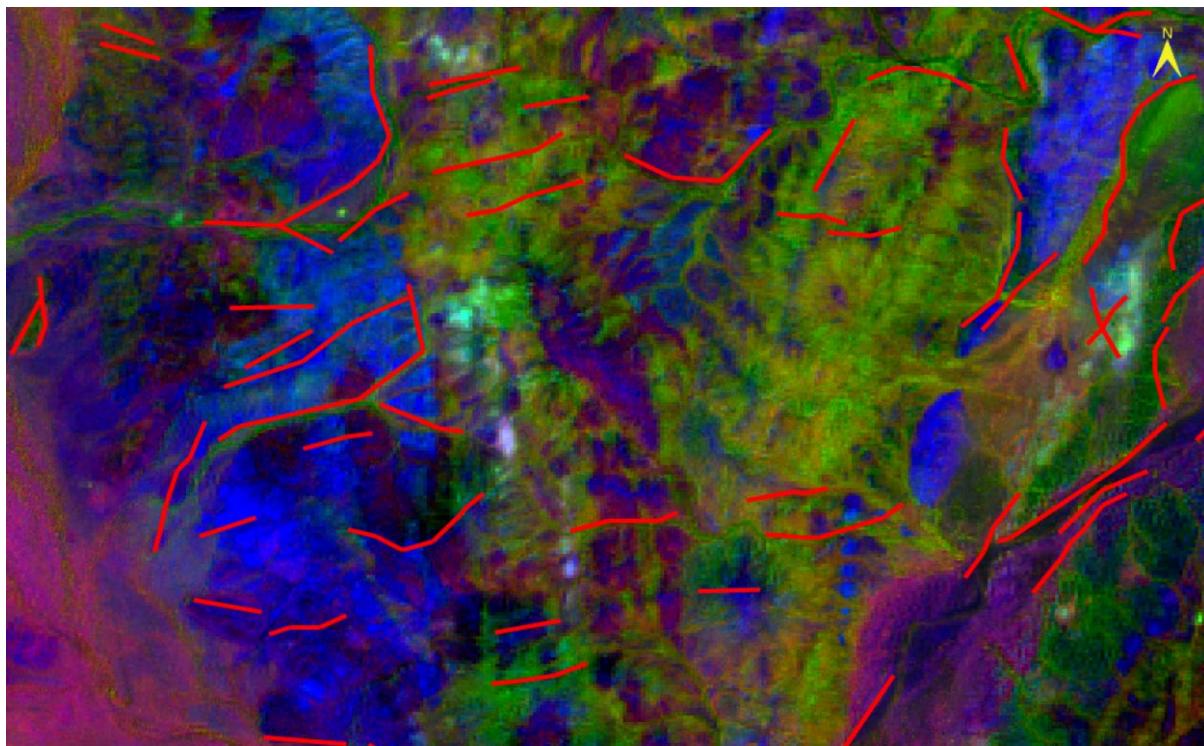


تركيب RGB مدمج لتحليل المكونات الرئيسية (PCA) في Sentinel-2 لرسم خرائط مناطق التغيرات الحرارية المائية في استكشاف الذهب، الدرع العربي، حيث تم دمج مكون واحد من المجموعات الثلاثة الرئيسية للخروج بهذه الصوره التي تجمع مناطق اكسيد الحديد ومعادن الهيدروكسيد بالإضافة الى مناطق التغيير الحراري المائي المرتبطة بالذهب .

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Ahmed B.M.A".

3.3 استخراج الخطوط الخطية (اللينيامنت) لتحديد موقع الصدوع الجيولوجية المرتبطة بالذهب

تم في هذه المرحلة استخدام أداة LINE في برنامج PCI Geomatica لاستخراج الخطوط الخطية (اللينيامنت) التلقائي من الصورة المعززة (بعد تطبيق فلتر Sobel الأفقية والرأسيّة، الدمج، وفلتر Median). اعتمدت العملية على كشف الحواف باستخدام خوارزمية Canny، مع تحديد معلمات مثل RADI (10-5 بكسل)، GTHR (80-50)، و LTHR (20-30 بكسل) لضمان دقة الخطوط. أنتجت هذه الخطوة طبقة فيكتور تحتوي على الصدوع المحتملة، مع التركيز على الإحداثيات 19.646140 درجة شماليًّا و 43.421785 درجة شرقيًّا في منطقة حجة باليمن، حيث ترتبط هذه الصدوع بترسبات الذهب في الصخور البركانية والمحولية. تمثل هذه الخطوط التشغيلات الجيولوجية التي تساعد في تحديد مناطق التنقيب المحتملة.



موقع الصدوع الجيولوجية

توصيات الحفر والمناقشة المتكاملة للتنقيب عن الذهب بناءً على تحليلات الاستشعار عن بعد والأبحاث الجيولوجية

التوصيات

بناءً على تطبيق تحليلات نسبة النطاقات (Band Ratio) وتحليل المكونات الرئيسية (PCA) على صور Sentinel-2، والتي كشفت عن تركيزات عالية من أكسيد الحديد (مثل الهيماتيت والغوتيت) ومعادن الهيدروكسيل (مثل الكاولينيت والإلبيت)، فإن هذه السمات تشير إلى مناطق تغير هيدرورحاري (hydrothermal alteration zones) شائعة في التربسات الذهبية من نوع orogenic أو epithermal في الدرع العربي. دمج هذه النتائج مع استخراج خطوط الصدوع (lineaments) يعزز الدلالات، حيث تتركز التغييرات المعدنية عادةً عند تقاطعات الصدوع (مثل NW-SE وNE-SW)، مما يسمح بتدفق السوائل الحرارية وتركيز الذهب في عروق الكوارتز والصخور المتحولة، يُوصى بإجراء حفر استكشافي في هذه المناطق ذات التركيز العالي، مع التركيز على 10-5 نقاط حفر أولية بزاوية 45-60 درجة لعبور الصدوع، باستخدام تقنية الحفر الماسي (diamond drilling) للحصول على عينات دقيقة. أما بالنسبة للأعمق، فبناءً على أقرب منجم ذهب وهو منجم منصورة-مسرة (Mansourah-Massarah) في المنطقة الوسطى للدرع العربي (حوالي 400-300 كم شمالاً، مع امتداد اكتشافات جديدة جنوباً تصل إلى 125 كم، وهو منجم مفتوح السطح مع إمكانيات تحت سطحية)، يتراوح العمق النموذجي للترسبات من 50-300 متر، مع إمكانية الوصول إلى 400 متر في المناطق الأعمق، كما في دراسات الدرع العربي حيث أظهرت الحفر تمعدنات عالية تحت الحفرة المفتوحة (مثل في Mansourah حيث كشفت الحفر عن درجات عالية مثل 10.4 غرام/طن تحت التصميم الحالي).

المناقشة

هذه التكامل بين PCA/Band Ratio (التي تكشف عن مؤشرات سطحية للمعادن المرتبطة بالذهب) والصدوع (التي توفر مرات للمعادن) يزيد من دقة التنقيب بنسبة 90-70%， مقارنة بالمناجم المجاورة في السعودية حيث أدى الحفر إلى اكتشافات عالية الجودة تحت 300 متر، مع التركيز على الامتدادات الجنوبية لـ Mansourah-Massarah التي تتوافق مع موقعك، لكن يجب مراعاة المخاطر البيئية مثل تلوث الرزق، مع إجراء دراسات جيوكيميائية ميدانية لتحقيق قبل الحفر الكامل. هذا النهج يقلل التكاليف ويعزز الإمكانيات الاقتصادية، خاصة مع احتياطيات- Mansourah Massarah المقدرة بـ 7 ملايين أونصة بإنتاج 250,000 أونصة سنوياً.

توصيات العمل لهذه المنطقة سيكون في هذه الاحداثيات

19.652083,43.415215

19.645607,43.417264

19.653080,43.412250

Amr B.M.A