

تقنيات دراسة تجوية الصخور مع التطبيق على بعض المكاشف الصخرية حول طريق القصير - قفط، الصحراء الشرقية، مصر

د. عمرو محمد صبري محسوب

د. معوض بدوي معوض بدوي

البريد الإلكتروني:

البريد الإلكتروني:

amr_saleem@art.asu.edu.eg

moawad.badawy@art.asu.edu.eg

الوظيفة: مدرس الجغرافيا الطبيعية بكلية

الوظيفة: استاذ الجغرافيا الطبيعية المساعد بكلية

الآداب جامعة عين شمس

الآداب جامعة عين شمس

الملخص:

تتعدد تقنيات دراسة ظاهرات التجوية ما بين الحقلية والمعملية. وقد ركزت الدراسة الحالية على ثلاث من التقنيات المستخدمة على نطاق واسع في دراسات تجوية الصخور، مثل: ١- تطبيق المساحة التصويرية من مدى قريب في رصد وقياس أشكال التجوية المتوسطة وصغيرة الحجم، ٢- استخدام مطرقة شميت في التقدير الكمي لدرجة تماسك الصخر، ٣- توظيف تحليل الأشعة السينية الحيودية XRD في تفسير عمليات التغير المعدني للصخور تحت تأثير التجوية الكيميائية. وقد تم تطبيق تلك التقنيات في رصد وتحليل بعض أشكال تجوية صخور الحجر الرملي الكريتاسي وصخور القاعدة النارية والمتحولة (صخور ما قبل الكامبري) من ثلاثة مواقع على طريق القصير - قفط بالصحراء الشرقية. وقد خلصت الدراسة إلى وجود تنوع في أشكال ودرجات تجوية الصخور في مواقع الدراسة، مع الأخذ في الاعتبار نوع الصخر وعمره وخصائصه البنيوية.

الكلمات المفتاحية: التجوية، المساحة التصويرية من مدى قريب، مطرقة شميت، تحليل الأشعة السينية الحيودية، الحجر الرملي النوبي، صخور القاعدة، التافوني، التلال المتخلفة، الصحراء الشرقية.

Abstract:

Rock weathering techniques: Applications on some outcrops, Qusier-Qift Road, Eastern Desert, Egypt

A wide range of field and laboratory techniques are used to probe rock weathering. The current study focuses on three techniques, such as: 1- Close Range Photogrammetry to document and measure small and medium scale features, 2- Schmidt hammer to quantify rocks compressive strength and 3- X Ray Diffraction to identify mineralogical alterations due to chemical weathering. These techniques are used to observe weathering of some outcrops along Qusier-Qift road, specifically Cretaceous sandstone and Precambrian basement complex (igneous and metamorphic rocks). It is found that the weathering forms-degrees are varied according to age, lithology and structures.

Keywords: Weathering, Close Range Photogrammetry, Schmidt hammer, XRD, Nubian Sandstone, Basement complex, Tafoni, Tors, Eastern Desert.

أولاً: مقدمة:

تؤدي عمليات التجوية إلى تفكك الصخور القشرة الأرضية موضعياً على سطح الأرض أو بالقرب من السطح. ويحدث تفكك البناء الصخري بفعل التجوية ببطء على مدى زمني جيولوجي، مما يترتب عليه تراكم نواتج التجوية بكميات ضخمة^(١). وتساهم التجوية من منظور جيومورفولوجي بشكل رئيس في تطور أشكال سطح الأرض، حيث تمثل مصدر إمداد للرواسب والمفتتات (نواتج التجوية) التي تنقلها عمليات التعرية لاحقاً^(٢).

ويمكن التمييز بين التجوية الميكانيكية والتجوية الكيميائية بشكل تقليدي، وذلك حسب طبيعة نواتج التجوية؛ حيث تؤدي التجوية الميكانيكية إلى تفكك الصخر دون تغير في خصائصه الكيميائية والمعدنية، بعكس التجوية الكيميائية. وتتوقف سيادة أيًا من نوعي التجوية على الظروف البيئية السائدة؛ حيث يمثل وجود المياه مع الحرارة عاملاً محفزاً لتحلل الصخر كيميائياً، ويسود هذا النوع في المناطق المدارية الحارة الرطبة^(٣). وتعد عملية التمدد والانكماش الصخري

الناجمة عن التباين الحراري أحد أهم عمليات التفكك الميكانيكي للصخور في الصحاري^(٤). وهنا تجدر الإشارة إلى وجود العديد من مظاهر التجوية الموروثة في الصحاري والتي تشكلت في ظروف مناخية أكثر رطوبة من تلك السائدة في الوقت الراهن^(٥).

وقد ركزت العديد من الدراسات السابقة على الأشكال الجيومورفولوجية الناتجة عن تجوية بعض الأنواع الصخرية مثل الحجر الجيري والحجر الرملي والجرانيت، ومنها على سبيل المثال:

١. تجوية صخور الحجر الرملي:

تطورت دراسات تجوية الحجر الرملي خلال قرن من الزمان وانتقلت من تطبيق أسلوب الدراسة الوصفي لتصنيف الأشكال الناتجة عن التجوية خلال القرن التاسع عشر إلى تطبيق العديد من التجارب الحقلية والمعملية في تفسير نشأة وتطور هذه الأشكال خلال القرن العشرين^(٦).

ويمثل تجويف الصخر بفعل التجوية cavernous weathering أحد أبرز ملامح تجوية الحجر الرملي الشائعة في المناطق الصحراوية والسواحل، والتي تؤدي إلى تكوين فتحات في المكاشف الصخرية الرأسية وشبه الرأسية بما في ذلك واجهات الجلاميد الصخرية^(٧). وتختلف تسمية الأشكال الناتجة عن تجويف الصخر بالتجوية: فتعرف أحياناً بفجوات التافوني، وهي عبارة عن فجوات مقعرة وبيضاوية الشكل ذات مداخل مقوسة، وتتراوح أبعادها ما بين عدة سنتيمترات وبضعة أمتار، وترتبط نشأتها بمواضع الضعف البنيوي في الصخور المتمثلة في أسطح الانفصال الطبقي والفواصل البنيوية^(٨). وقد توجد على هيئة ثقب صغيرة لا تتعدى أبعادها عدة سنتيمترات، وتوجد متقاربة يفصل بينها نتوءات صخرية بسمك عدة ملليمترات فيما يعرف بأقراص العسل أو الحويصلات الصخرية alveoli^(٩).

٢. تجوية صخور الجرانيت:

يعد صخر الجرانيت من أشد الأنواع الصخرية مقاومة لعمليات التجوية والنحت مقارنة بالأنواع الصخرية المحيطة، ومن ثم يرتبط بتشكيل الجرانيت تكون تضاريس موجبة ذات انحدارات شديدة^(١٠). ويتعرض صخر الجرانيت لتأثيرات التجوية التفاضلية على سطح الأرض وتحت السطح، وذلك في ضوء تحكم خصائص البنية الجيولوجية ونسيج الصخر مثل نظم الفواصل البنيوية والتشققات البنيوية الدقيقة microfractures والأعناق المعدنية veins والجيوب المعدنية enclaves، وكل هذا يؤدي إلى اختلاف أنماط تفكك الصخر من موقع لآخر، ومن ثم تنوع مورفولوجية أشكال تجوية الجرانيت^(١١).

وتتعدد المصطلحات المستخدمة في وصف أشكال تجوية صخور الجرانيت، وذلك بالنسبة للأشكال كبيرة الحجم مثل: الجلاميد boulders، والتلال المتخلفة tors، والأحواض الجبلية أو الأشكال الصغيرة مثل الحفر والتافوني ومضلعات التجوية^(١٢). ويمكن تناول بعض المعايير المستخدمة في تمييز الأشكال كبيرة الحجم؛ حيث يقصد بالجلاميد تلك الكتل المنفصلة تمامًا عن الصخر الأم والتي تزيد أقطارها على ٢٥ سنتيمترًا وغالبًا ما تتوزع في نمط حقول من الجلاميد، في حين توجد توجد غالبية صخور تلال الجرانيت متجمعة ومتجدرة مع الصخر الأم^(١٣).

وتقوم العديد من الدراسات السابقة على فكرة تصنيف درجات التجوية من خلال القياس الكمي لمدى شدة التجوية. ويستخدم في ذلك العديد من تقنيات الدراسة الحقلية والمعملية، والتي يمكن إنجازها على النحو التالي:

- تقنيات توثيق وقياس أبعاد أشكال التجوية: مثل استخدام التصوير أو تقنية المساحة التصويرية من مدى قريب أو استخدام جهاز ماسح الليزر الأرضي (TLS) Terrestrial Laser Scanner. وتختلف هذه التقنيات في دقة القياس، ويتوقف استخدامها على التكلفة ومدى توفر الأجهزة والقدرة الفنية على التشغيل. ويعد التصوير أيسر تلك التقنيات ويستخدم على نطاق واسع في هذا المجال. فعلى سبيل المثال قدمت اللجنة الدولية العلمية للصخور بالتعاون مع المجلس الدولي للمعالم والمواقع^(١٤) قائمة شاملة بالمصطلحات المستخدمة في توصيف تجوية الصخور الأثرية مع الصور. كما استخدمت دراسة (Fitzner et al. 2003) تقنية الرسم من الصور في تصنيف درجات تجوية واجهات صخور الحجر الرملي في معبد الكرنك جنوب مصر. ويمثل جهاز ماسح الليزر أداة سريعة ودقيقة تستخدم حديثًا في رصد وقياس معدلات تجوية الصخور، ويتطلب تشغيل الجهاز وجود فني متخصص وغالبًا ما ترتفع تكاليف تشغيل ونقل الجهاز عن إمكانيات العديد من الباحثين مما يعطي ميزة نسبية لاستخدام تقنيات أخرى مثل التصوير الرقمي والمساحة التصويرية من مدى قريب^(١٥).
- تقنيات قياس صلابة الصخور: يرتبط بعمليات التجوية إضعاف صلابة الصخور بدرجات مختلفة، هذا ما يمكن قياسه كميًا باستخدام بعض الأجهزة في الحقل مثل استخدام جهاز مطرقة شميت، أو توظيف جهاز قياس سرعة الموجات فوق الصوتية ultrasonic في استنباط درجات صلابة الصخور.

■ تحليلات جيولوجية: تهدف تلك التحليلات إلى فحص أثر التجوية الكيميائية على الصخر من خلال دراسة الخصائص المعدنية لنواتج التجوية (من صخور ومفتتات ورواسب) باستخدام بعض الوسائل مثل: القطاعات الصخرية الرقيقة thin sections، والميكروسكوب الإلكتروني الماسح (SEM) Scan Electronic Microscope، وتقدير محتوى معادن الصخر باستخدام جهاز الأشعة السينية الحبيدية (X Ray Diffraction (XRD).

وتهدف الدراسة الحالية إلى استعراض ثلاثة نماذج من التقنيات المستخدمة على نطاق واسع في دراسة تجوية الصخور والتي تعد عنصرًا جوهريًا في بحوث التجوية من تخصصات مختلفة. وقد أمكن تطبيق هذه التقنيات عمليًا على بعض المكاشف الصخرية على امتداد طريق القصير- قفط بالصحراء الشرقية بهدف إظهار العلاقة بين خصائص الصخور وأعمارها ومظاهر التجوية المرتبطة بها.

ثانيًا: تقنيات الدراسة:

١. المساحة التصويرية من مدى قريب (البناء من الحركة):

يشير مصطلح المساحة التصويرية photogrammetry إلى علم وفن الحصول على قياسات وبيانات مجسمة عن سطح الأرض من صورتين أو أكثر، ويرتبط بعملية التصوير الجوي التقليدي من الطائرات المرتفعة. ويندرج نفس المفهوم على مصطلح المساحة التصويرية من مدى قريب close range photogrammetry، وإن كان الأخير يشير إلى عملية التصوير من منصات جوية قريبة من سطح الأرض (مثل الطائرات المنحطة أو المروحية والمسيرة بدون طيار)، أو عملية التصوير على سطح الأرض (باستخدام كاميرات رقمية محمولة على اليد مباشرة أو مرفوعة على حوامل). وتحدد المسافة ما بين كاميرا التصوير وسطح الأرض من مدى قريب حتى ٣٠٠ متر^(١٦). ويستخدم مصطلح تقنية البناء من الحركة structure from motion (SfM) كمرادف لمصطلح المساحة التصويرية من مدى قريب^(١٧).

وتُستخدم تقنية المساحة التصويرية من مدى قريب في العديد من الدراسات السابقة في تخصصات متنوعة، مثل: دراسة التقطع البنيوي للصخور من المكاشف الصخرية بتطبيق المساحة التصويرية من مدى قريب بالتكامل مع ماسح الليزر^(١٨). ومتابعة نحت السواحل بتطبيق المساحة التصويرية باستخدام طائرات مسيرة بدون طيار^(١٩)، فضلًا عن توظيفها على نطاق واسع في الصخور الأثرية^(٢٠). كما استُخدمت تقنية المساحة التصويرية من مدى قريب (البناء من الحركة)

في متابعة تجوية الصخور الطينية والحجر الجيري شمال النرويج^(٢١)، وقد اعتمدت الدراسة على طلاء مساحات محددة من الواجهات الصخرية في عام ٢٠٠٢ مع تطبيق عملية التصوير عام ٢٠١٥ ومن ثم أمكن تقدير معدلات التجوية.

ويتطلب تطبيق المساحة التصويرية من مدى قريب في الأعمال البحثية توفر بعض المكونات المادية مثل كاميرا تصوير رقمية عالية الدقة وجهاز للرفع المساحي وعلامات أرضية بالإضافة إلى برمجيات متخصصة. وقد أمكن تطبيق تقنية المساحة التصويرية من مدى قريب في الدراسة الحالية من خلال إتباع بعض الخطوات كما يلي:

■ الأعمال الحقلية (عملية التصوير والرفع المساحي)

تركزت عملية التصوير على رصد عدد ثلاثة مكاشف رأسية تراوحت مساحتها بين ٢٠ م^٢ و ٢٨٠ م^٢ تقريباً، بالإضافة الي تصوير مكشف أفقى من سطح الأرض بمساحة ١٠ م^٢ تقريباً. ولم تعد المسافة الفاصلة ما بين كاميرا التصوير والنطاقات المغطاة بضعة أمتار (في حدود خمسة أمتار في المتوسط). وقد تمت عملية التصوير في الدراسة الحالية باستخدام كاميرا رقمية موديل Canon EOS 600D بدقة ١٨ ميغابيكسل ذات بعد بؤري يتراوح ما بين ١٨ و ٥٥ ملليمترًا. وهنا يلزم تثبيت البعد البؤري للكاميرا وعدم تكبير أو تصغير العدسة خلال جلسة التصوير الواحدة^(٢٢).

ويجب الأخذ في الاعتبار بعض الجوانب الفنية أثناء عملية التصوير خصوصاً ما يتعلق بتحقيق شرط تداخل الصور الملتقطة بالتتالي، حيث أن تغطية الهدف (ظاهرة الدراسة) من أكثر من زاوية يمثل مبدأ أساسياً في المساحة التصويرية، ومن ثم يمكن بناء الشكل ثلاثي الأبعاد من مجموعة الصور المتداخلة^(٢٣). ويمكن تحقيق عملية التداخل من خلال ضبط عداد خطوات الحركة حول الهدف أثناء التصوير، وقد تكون الحركة دائرية أو نصف دائرية حول الهدف لتحقيق أكبر حيز من التغطية مع تحقيق التداخل ما بين الصور (شكل ١).

وقد استُخدمت الكاميرا محمولة على اليد في وضع رأسي وموازي تقريباً للمكاشف الصخرية شبه الرأسية (ذات ميول شديدة). وبالنسبة لتصوير المكشف الأفقي من سطح الأرض تمت عملية التصوير من ربوة مرتفعة عن الهدف مع إمالة زاوية التصوير (شكل ٢). ويفضل إلتقاط جميع الصور في وقت سطوع الشمس على الظاهرة على أن يكون اتجاه أشعة الشمس في نفس اتجاه التصوير، مع تجنب حجب السحب لضوء الشمس أثناء عملية التصوير.

وقبل البدء في عملية التصوير يكون من الضروري وضع مجموعة من علامات للربط الأرضي (GCPs) Ground Control Points، وهي عبارة عن علامات مادية تظهر بوضوح في الصور. ولا يقل عدد العلامات المستخدمة عن ثلاث علامات كحد أدنى ويتوقف عدد العلامات المستخدمة على أبعاد نطاق التغطية، بحيث تنتشر تلك العلامات في كل نطاق التغطية^(٢٤). وفي سياق الدراسة الحالية تم تصميم مجموعة من العلامات الخشبية المربعة بأبعاد ١٧ × ١٧ سم و ١٠ × ١٠ سم ملونة بالأبيض والأسود ومثقوبة من المركز.

وقد أستخدمت محطة أرصاد مساحية لرصد الإحداثيات الثلاثية (س - ص - ع) لمركز كل علامة بالنسبة لنقطة إفتراضية في الطبيعة. وهنا يجب التنويه إلى أهمية تثبيت تلك العلامات وعدم زحزحتها أثناء العمل لحين الإنتهاء من الرفع المساحي وعملية التصوير. وقد تم تثبيت العلامات الخشبية في الأسطح الصخرية باستخدام دواسر من الصلب.

■ المعالجة الرقمية للصور باستخدام برنامج Agisoft Metashape

تتعدد البرمجيات المستخدمة في المعالجة الرقمية للصور ما بين برامج تجارية وأخرى مجانية، وقد اعتمدت الدراسة الحالية على برنامج Metashape من إنتاج شركة Agisoft المتخصصة في المعالجة الرقمية لأعمال المساحة التصويرية. ويستخدم البرنامج على نطاق واسع في البحوث العلمية^(٢٥) كما يستخدم في العديد من التطبيقات. ويمكن الحصول على نسخة مفتوحة من البرنامج لفترة محددة لأغراض البحث العلمي من الموقع التالي:

<https://www.agisoft.com>.

وقد تضمنت الدراسة الحالية معالجة أولية للصور قبل تنفيذ المعالجة الرقمية باستخدام برنامج Metashape من خلال قص clipping خلفية الصور حول الهدف (نطاق التغطية)، حيث تظهر تلك الخلفية بدقة وضوح منخفضة نسبياً عن الهدف المرصود مثل السلاسل الجبلية الموجودة في خلفية الصور.

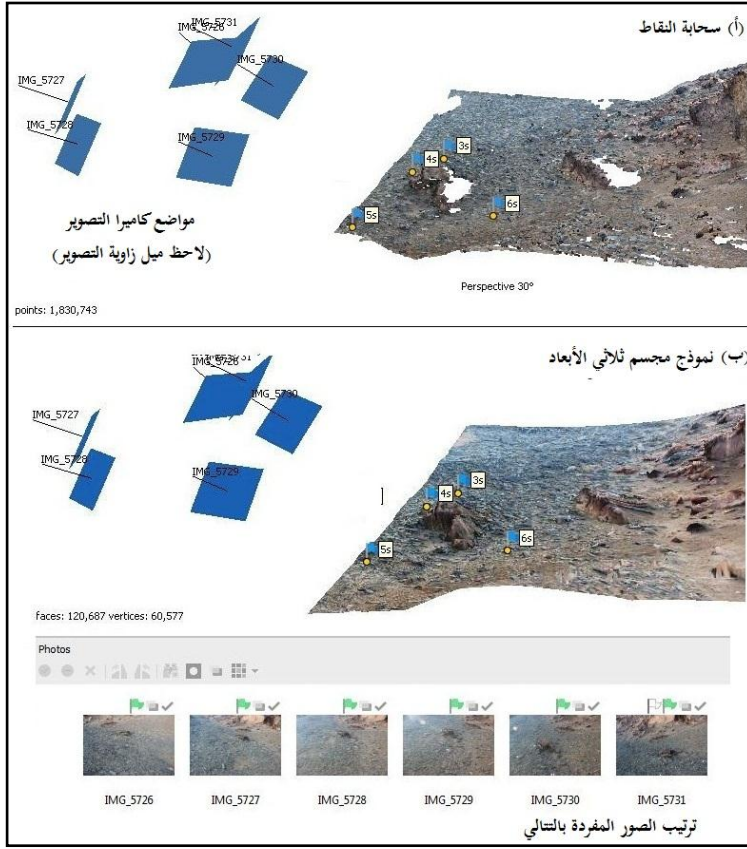
وتبدأ عملية معالجة الصور من خلال ترتيب الصور الملتقطة بالتالي بطريقة آلية في البرنامج photo alignment، يلي ذلك تحديد نقاط الربط الأرضي في كل صورة وإدراج الإحداثيات المسجلة لكل نقطة من ملف نصي، وتمثل هذه العملية خطوة مهمة لاستخراج القياسات بدقة عالية من مخرجات المساحة التصويرية، حيث يمكن الحصول على الصور المفردة المصححة rectified photos. وهنا يجب الإشارة إلى إمكانية تخطي تلك الخطوة في

البرنامج حال عدم توفر نقاط للربط الأرضي من خلال قياس مسافة معلومة في الطبيعة باستخدام شريط القياس وتحديدها في الصورة، وهذا ما أمكن تطبيقه في دراسات سابقة^(٢٦).

وتستخدم الخطوات السابقة في إنتاج سحابة من النقاط المجسمة مصححة ومعلومة الإحداثيات georefrenced 3D point cloud. وتحاكي سحابة النقاط سطح الأرض في الطبيعة (شكل ١٢) وتستخدم كمدخل للحصول على العديد من مخرجات المساحة التصويرية مثل موزايك الصور المصححة ونموذج مجسم ثلاثي الأبعاد لسطح الأرض 3D model (شكل ٢ب) ونموذج الارتفاعات الرقمي DEM.



شكل (١) تطبيق المساحة التصويرية على مكشف صخري رأسي في موقع (١)



شكل (٢) تطبيق المساحة التصويرية على مكشف صخري أفقي في موقع (١)

٢. استخدام مطرقة شميت في دراسة التجوية:

تؤدي عمليات التجوية إلى تفكيك بنية الصخور بدرجات مختلفة حسب شدة التجوية. وتمثل الرواسب والمفتتات ضعيفة التماسك المنتج النهائي للتجوية. ويمكن التمييز بين المكاشف الصخرية المجواه والرواسب والمفتتات تبعًا للقوة التماسكية للمادة الصخرية مع التعرض للضغط compressive strength بمقياس الميجاباسكال MPa، حيث تقل القوة التماسكية للرواسب والمفتتات عن ١ ميجاباسكال^(٢٧).

وتستخدم مطرقة شميت (والأنواع المطورة عنها) بشكل واسع في قياس صلابة المواد (مثل القوة التماسكية للصخر)؛ حيث تُستخدم المطرقة التقليدية في قياس صلابة الخرسانة منذ منتصف القرن العشرين، وقد تم توظيفها لاحقًا في العديد من الدراسات المرتبطة بقياس صلابة الصخور في الحقل ومنها الدراسات الجيومورفولوجية ودراسات التجوية^(٢٨).

تقوم فكرة عمل مطرقة شميت التقليدية على توليد قدر من الطاقة صوب الصخر وقياس رد الفعل؛ حيث يتألف الجهاز من مكبس زنبركي *spring loaded piston* مرتبط برأس متحرك تخرج من الجهاز (مضرب) *plunger* (شكل ١٣)، ومع توجيه الرأس بالضغط صوب الصخر يتولد قدر محدد من الطاقة وترتد الرأس داخل الجهاز (شكل ٣ب) مسجلة قيمة تتراوح ما بين صفر و ١٠٠ (فيما يعرف بقيمة رد الفعل). وتُعبّر قيمة رد الفعل عن درجة مقاومة الصخر للطاقة المولدة والتي ترتبط مباشرة بدرجة الصلابة، وكلما زادت درجة المقاومة (الصلابة) زادت قيمة رد الفعل والعكس صحيح^(٢٩). وغالبًا ما يتم تشغيل الجهاز في وضع أفقي متعامد على الواجهات الصخرية (شكل ١٤)، وفي حال تغيير وضعية الجهاز (زاوية ميل الجهاز عن الوضع الأفقي) حسب امتداد المكشف الصخري في الطبيعة يلزم معايرة قراءات رد الفعل باستخدام منحنى المعايرة (شكل ٤).

وقد اعتمدت الدراسة الحالية على بروتوكول المجموعة الدولية لميكانيكا الصخور *International Society for Rock Mechanics (ISRM)* الخاص بطريقة استخدام مطرقة شميت وعدد القراءات المسجلة؛ حيث يتم تسجيل ٢٠ قراءة في الموضع الواحد (الواجهة الصخرية) مع مراعاة ترك مسافة ما بين كل قراءة والقراءة التالية بما لا يقل عن قطر الرأس المتحرك، بما يضمن الحصول على قراءات معبرة دون تعرض الصخر للتفكك أو التشقق مع تكرار عملية القياس. و يتم استبعاد أقل عشر قراءات وحساب متوسط أعلى عشر قراءات للحصول على قيمة رد الفعل المعبرة عن صلابة الصخر^(٣٠).

وتوجد ثلاثة أنواع من مطرقة شميت التقليدية حسب مقدار الطاقة المولدة *impact energy*: وهي مطرقة النوع (P) المستخدمة مع مواد ضعيفة ذات قوة تماسكية أقل من ٧٠ كيلوباسكال، ومطرقة النوع (L) بطاقة ٠,٧٣٥ نيوتن متر، ومطرقة النوع (N) بطاقة ٢,٢٠٧ نيوتن متر التي تستخدم في دراسة الصخور ما بين الضعيفة والقوية جدًا بقوة تماسكية تتراوح ما بين ٢٠ و ٢٥٠ ميغاباسكال. وتعد الأخيرة الأكثر استخدامًا في الدراسات الجيومورفولوجية^(٣١)، وقد تم استخدامها في الدراسة الحالية.

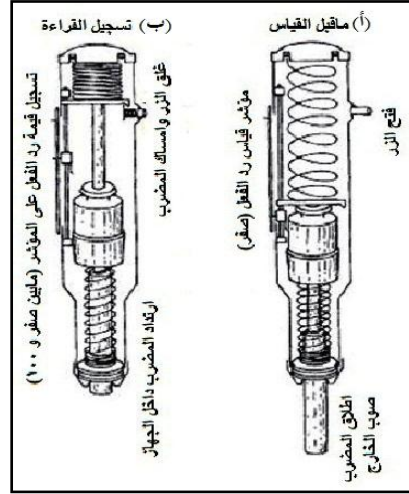
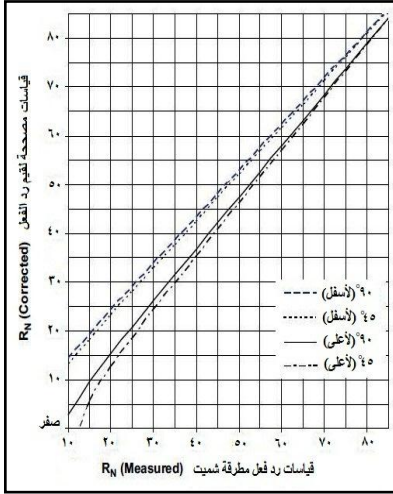
وقد تم تطوير مطرقتي (L) و (N) في موديل جديد يعرف باسم مطرقة سيلفر *Silver Schmidt* (شكل ٥) التي تتميز بوزن أخف (حوالي ٦٠٠ جرام) مع تسجيل القراءات إلكترونياً وإمكانية تحميل القراءات لاحقاً^(٣٢). وحديثاً أمكن توظيف مطرقة قياس صلابة المعادن *Equotip* (بطاقة مولدة ١١ نيوتن ملليمتر) في دراسة تجوية الصخور. ويعمل جهاز

Equotip بدقة في دراسة تجوية الصخور الأثرية ورصد بعض الظواهر الدقيقة مثل قشرات التجوية من دون أي أثر تدميري على الصخر^(٣٣).

وتؤثر الظواهر الدقيقة لتجوية الأسطح الصخرية على قراءات مطرقة شميت بالسلب. فعلى سبيل المثال يلاحظ اهتزاز المطرقة، وانخفاض قيم رد الفعل عند إجراء القياسات من الأسطح الجواه (المتأثرة بفواصل التجوية أو فقدان جزء من الصخر)، كما تزداد قيم رد فعل مطرقة شميت مع تكرار تنظيف الواجهات الصخرية الجواه باستخدام حجر مخصص لطحن الصخر^(٣٤).

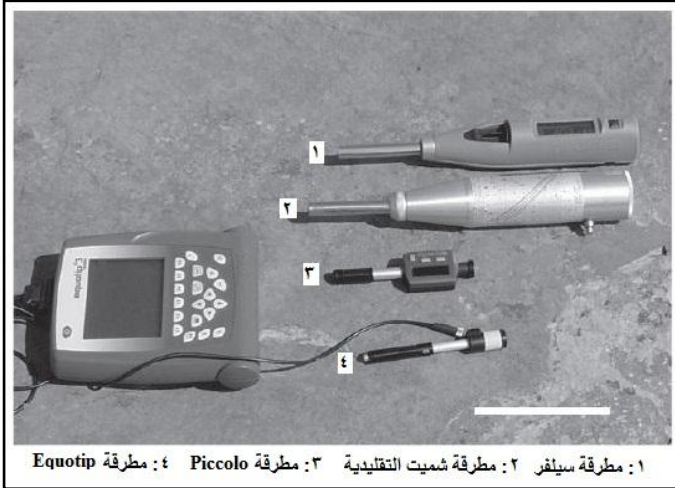
ومن هنا أمكن توظيف مطرقة شميت بفاعلية في العديد من دراسات التجوية. فعلى سبيل المثال تناولت دراسة (Matsukura and Matsuoka 1996) العلاقة ما بين حجم فحوات التافوني ونوع وصلابة الصخور التي تكونت فيها، حيث يتكون التافوني كبير الحجم في صخور ضعيفة ذات قيم رد فعل منخفضة (مثل الكونجولومرات وصخور الرماد البركاني (tuffs)، في حين يوجد التافوني بأحجام أقل في صخور أشد صلابة ذات قيم رد فعل مرتفعة نسبياً مثل البازلت والأنديزيت والجرانيت والحجر الرملي.

واعتمدت العديد من الدراسات السابقة على استخدام قراءات مطرقة شميت في التصنيف الكمي لدرجات التجوية بالتكامل مع استخدام تقنيات أخرى. فعلى سبيل المثال قدمت دراسة (Arikan et al. 2007) تصنيفاً لتجوية صخور الأنديزيت والدايسيت (صخور بركانية حامضية شمال تركيا) باستخدام مطرقة شميت (جدول ١)، مع الأخذ في الاعتبار بعض مقاييس الخصائص الميكانيكية للصخور. كما تناولت دراسة (Le Pera and Sorriso-Valvo 2000) تجوية صخور الجرانيت في جزيرة كالابريا - جنوب إيطاليا بتطبيق قياسات مطرقة شميت بالتكامل مع قياس محتوى معدن البيوتيت في الصخر، حيث تتناقص قيم رد الفعل مع زيادة درجة التجوية وارتفاع محتوى الصخر من معدن البيوتيت.



شكل (٤) معايرة قياسات رد فعل مطرقة (N) المصدر: Aydin, 2009

شكل (٣) تشغيل مطرقة شميت المصدر: Aydin, 2009



شكل (٥) أدوات قياس رد الفعل وتقييم صلابة الصخور في الحقل

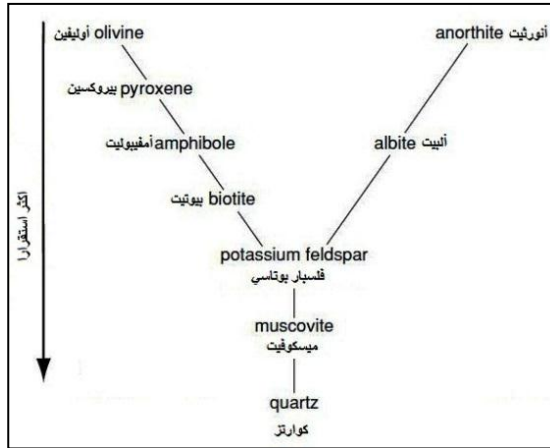
المصدر: Viles et al., 2011

٣. التحليل المعدني باستخدام الأشعة السينية الحيودية XRD:

يستخدم تحليل الأشعة السينية الحيودية XRD في تقدير المحتوى النسبي للمعادن في الصخور والرواسب. ويستخدم هذا التحليل على نطاق واسع في تمييز المعادن الأولية المكونة للصخور عن تلك المعادن الثانوية الناتجة عن فعل التجوية الكيميائية.

ويمثل وجود بعض المعادن الطينية دليلاً على التجوية الكيميائية لصخور الجرانيت. وتعد عملية التحلل المائي hydrolysis أهم عمليات التجوية الكيميائية وأكثرها شيوعاً وتأثيراً على معادن السليكات المكونة لصخور الجرانيت، فعلى سبيل المثال ينتج معدن الكاولينيت عن معدن الفلسبار البوتاسي (الأورثوكليز) وينتج معدن السمكتيت عن معدن الألبيت (بلاجيوكليز) تحت تأثير عملية التحلل المائي^(٣٥). ويستدل من وجود بعض المعادن الطينية الثانوية على تجوية الصخور النارية البركانية. مثل تكون معدن السمكتيت تحت ظروف تجوية عميقة لصخر الأنديزيت البازلتي^(٣٦). كما ترتفع نسبة معدن السمكتيت مع التقدم في مراحل تجوية صخر الأنديزيت^(٣٧).

وتختلف قابلية المعادن للتجوية الكيميائية حسب خصائص التركيب الكيميائي والبلوري للمعدن، وذلك بالتطبيق على معادن السليكات الشائعة في الطبيعة؛ حيث يتعرض معدن الكوارتز للتجوية الكيميائية ببطء نظراً لوجود رابط كيميائي قوي ومباشر ما بين عنصري السليكا والأكسجين المكونين للمعدن^(٣٨). وعموماً يقع معدني الكوارتز والأوليفين على طريقي نقيض من حيث مقاومة عمليات التجوية الكيميائية مع وجود معدن الفلسبار البوتاسي في مرتبة وسطى (شكل ٦).



المصدر: Migon, 2006

شكل (٦) استقرار معادن السليكات لعمليات التغير بفعل التجوية الكيميائية

جدول (١) نظام مقترح لتصنيف درجات تجوية الصخور البركانية الحامضية

درجة التجوية	فئة التجوية	وصف حالة الصخر (المفتتات والرواسب)	قراءات مطرقة ثميت
١	غير مجوى Fresh	لا يوجد أي مظهر لتجوية الصخر مع تغير محدود في لون الصخر عند مواضع التقطع البنيوي discontinuity	رد الفعل < ٥٠
٢	تجوية محدودة Slightly weathered	تغير واضح في لون الصخر عند مواضع التقطع البنيوي. مع تغير واضح في لون بلورات الفلسبار وإمكانية ازلتها بأظافر اليد	رد الفعل > ٤٠ ٥٠ ≥
٣	تجوية متوسطة Moderately weathered	تغير في اللون الخارجي للصخر. مع امتلاء مواضع تقطع الصخر بنواتج التجوية مثل الطين والسليكا والكربونات. مع إمكانية افتكاك بعض الصخور بأصابع اليد. وتكون نسبة الصخر إلى الرواسب < ٥٠%	رد الفعل > ٣٠ ٤٠ ≥
٤	تجوية عالية Highly weathered	تغير واضح في اللون الخارجي للصخر وضعف صلابة الصخر بشكل عام. وان كان الصخر مازال محتفظ ببنيته. ولا يبدو تقطع الصخر البنيوي بارزاً. وتكون نسبة الصخر إلى الرواسب > ٥٠%	رد الفعل > ٣٠
٥	تجوية تامة Completely weathered	يفقد الصخر بنيته بشكل واضح ويضعف تماسك الصخر. ويتحول جزء كبير من الصخر إلى رواسب ومفتتات	لا يمكن استخدام المطرقة في الحصول على قراءات
٦	تربة ورواسب مفككة Residua soil	تتفني بنية الصخر تماماً. ويتفكك كل المحتوى الصخري إلى رواسب ومفتتات. وتكون نواتج التجوية أقل حجماً مقارنة بالفئة السابقة (٥)	لا يمكن استخدام المطرقة في الحصول على قراءات

المصدر: Arikan et al., 2007

ثالثاً: منطقة الدراسة:

تم اختيار ثلاثة مواقع على جانبي طريق القصير - فقط بمحافظة البحر الأحمر بالصحراء الشرقية لمصر للتطبيق العملي لتقنيات الدراسة على مجموعة متنوعة من الصخور. وقد اختيرت منطقة الدراسة بحيث تشمل على تنوع صخري من الصخور الرسوبية وصخور القاعدة بالصحراء الشرقية، والتي تمثل واحدة من أقدم الصخور التي شكلت أرض مصر، والتي كانت عرضة لعمليات التجوية والتحات على طول تاريخها الجيولوجي.

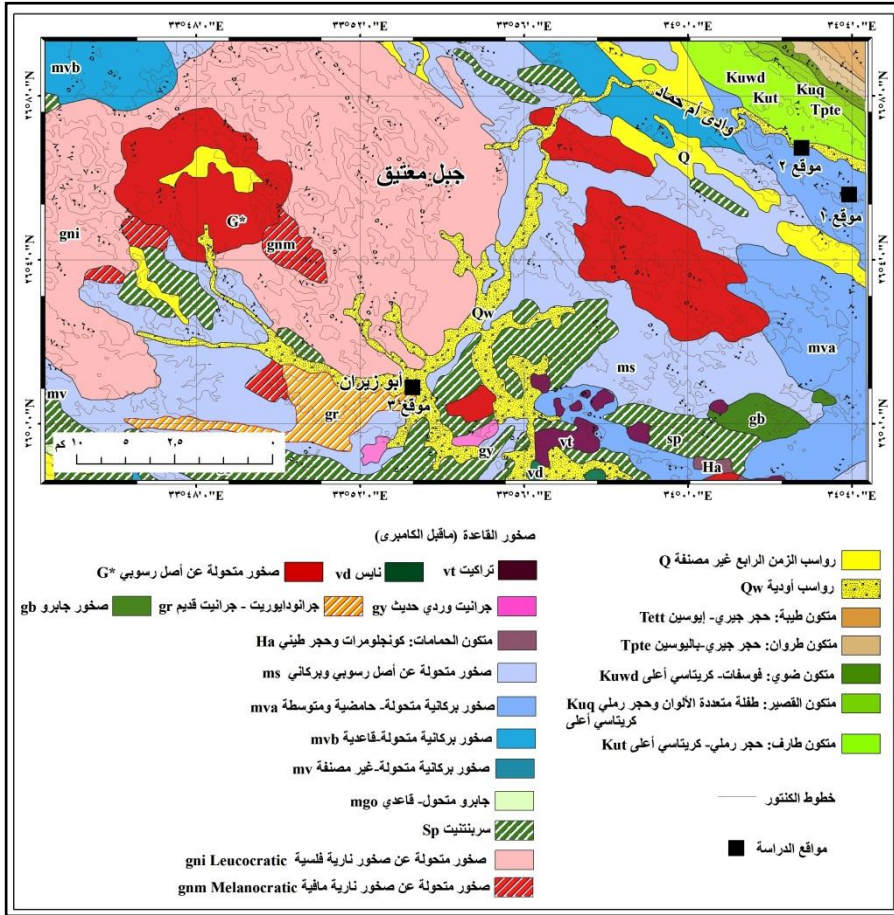
وتعد صحراء مصر الشرقية جزءاً أصيلاً من الأخدود الأفريقي العظيم، حيث يرجع مظهرها الجيولوجي والطبوغرافي الحالي إلى تأثير تكوين البحر الأحمر الذي يفصل بين الدرع العربي في الشرق والدرع النوبي في الغرب، والذي بدأ في التكوين منذ نحو ٢٣ مليون سنة^(٣٩). وتتكون مواقع الدراسة الثلاثة في هذا البحث بصفة رئيسية من صخور القاعدة النارية والمتحولة فضلاً عن جيوب محدودة المساحة من صخور الحجر الرملي الكريتاسي (شكل ٧). وتشكل صخور القاعدة ما يقرب من ٩٥% من مساحة المنطقة، وقد تكونت كلها في فترة ما قبل الكامبري، ويغلب عليها الجرانيت القديم (٦١٠ - ٧٥٠ مليون سنة قبل الآن)، والجرانيت الحديث (٥٨٠ - ٦١٠ مليون سنة قبل الآن)، والصخور المركبة migmatite مثل تداخلات الجرانيت والنايس، والصخور المتحولة عن أصل رسوبي metasediment، وكذلك الصخور البركانية المتحولة metavolcanic، علاوة على مجموعة أخرى متنوعة من صخور القاعدة مثل الجابرو والديورايت والانديزيت والبريشيا والمعروفة بمجموعة دخان^(٤٠). كما تعرضت المنطقة لاحقاً إلى تداخلات بركانية خلال الحركة البانية للجبال الإفريقية Pan-African Orogenic منذ نحو ٥٥٠ مليون سنة مضت، والتي إمتدت حتى ٩٠ مليون سنة قبل الآن، وتكونت خلالها الحلقات النارية المعقدة ring complex مثل جبل معيتق^(٤١).

ويوضح تحليل الخرائط الجيولوجية (لوحة سفاجا ١ : ١٠٠٠٠٠٠ ، ولوحة فنا ١ : ٢٥٠٠٠٠٠) تعرض الصحراء الشرقية عامة إلى مرحلتين من مراحل البناء خلال فترة ما قبل الكامبري. خلال المرحلة الأولى ظهر الجرانيت القديم على السطح، تبعه فترة نشاط بركاني هائل تكون خلالها الأنديزايت البروفيري ومجموعة دخان^(٤٢). ويعد الجرانيت القديم هو الأوسع انتشاراً والأقدم في مصر، مما جعله عرضة لعمليات التعرية والتجوية على مدى زمني طويل مقارنة بالصخور الأخرى. وخلال المرحلة الثانية تكون الجرانيت الحديث، ويظهر في مساحات صغيرة نسبياً على هيئة جبال بيضاوية أو مستديرة الشكل.

ويعلو مجموعة صخور القاعدة مجموعة صخور الحجر الرملي النوبي الكريتاسي، وهي أقدم طبقات رسوبية تستقر بسطح عدم توافق فوق صخور القاعدة في الصحراء الشرقية (شكل ٨). ويظهر الحجر الرملي النوبي في شكل جيوب محدودة المساحة في منطقة الدراسة، وذلك على حدود الإنكسارات الرئيسية، والتي تحدد بدايات المنخفضات التكتونية في وسط الصحراء الشرقية، ومن ثم تبدو مائلة بزوايا مختلفة تتراوح بين ٥ إلى ٢٥ درجة باتجاه الشرق والجنوب الشرقي في بعض المواضع. وتبدو صخور هذه الوحدة السفلى من الحجر الرملي النوبي خالية من الحفريات ويظهر عليها البنيات المتقاطعة cross-bedding مما يشير إلى أنها نشأت في ظل ظروف رياحية.

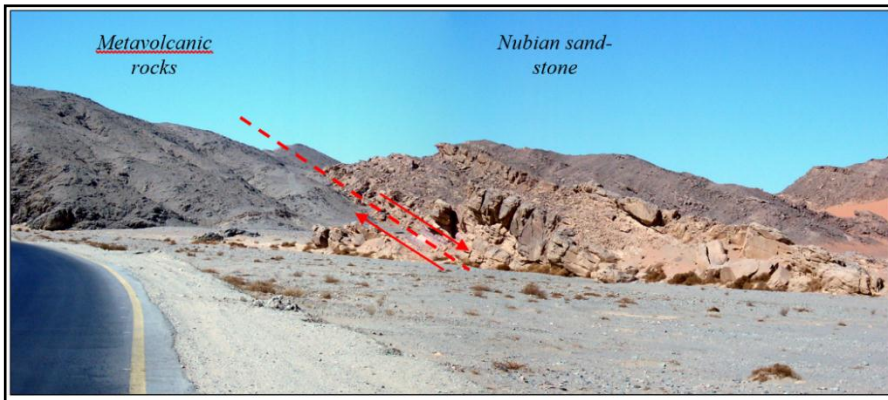
وتتأثر منطقة الدراسة بنظامين من الإنكسارات الصخرية الرئيسية (شكل ٧): الأول والمعروف بالإنكسارات الإفريقية أو الإرتيرية والتي تتخذ اتجاهاً عاماً بمحاذاة البحر الأحمر من الشمال الغربي باتجاه الجنوب الشرقي، وهي الأقدم والأكثر انتشاراً والتي تحدد الحافات الشرقية لمعظم الكتل الجبلية في الصحراء الشرقية عامة. أما النظام الثاني فيتماشى مع محور خليج العقبة من الشمال الشرقي باتجاه الجنوب الغربي وهو النظام الأحدث، والأكثر تأثيراً على صخور الزمن الثلاثي في الصحراء الشرقية عامة. وتبدو الإنكسارات من الوهلة الأولى من النوع البسيط، ومع هذا فهي من النوع المركب السلمي الذي يشير إلى وجود أكثر من أحدود أو منخفض تكتوني ثانوي يقع داخل الصحراء الشرقية بمصر.

أما عن المظهر الطبوغرافي العام. فتبدو المنطقة منقسمة إلى مجموعة من الكتل الجبلية متباينة الحجم والارتفاع بفعل نظام البنية الجيولوجية المعقد، حتى أن سطحها العلوى يبدو شديد التقطع على هيئة سطح تعرية قديم متهالك old erosion surface، في إشارة إلى مدى تعرضه لعمليات التآكل والتعرية على طول التاريخ الجيولوجي. ويتوسط منطقة الدراسة الجرى الرئيسي لوادي أم حماد وروافده العليا، والتي تجري بصفة رئيسية على طول خطوط الضعف البنيوي والاتصال الصخري، ولذلك تتكون رواسب الوادي من مجموعة مختلفة الحجم ومتنوعة من الصخور النارية والمتحولة وحتى الرسوبية. ويتدرج ارتفاع السطح عامة من الشرق إلى الغرب بين ١٣٠ متراً فوق قاع الوادي وأكثر من ٨٠٠ متر فوق بعض القمم الجبلية في منطقة الدراسة.



شكل (٧) خريطة جيولوجية لمنطقة الدراسة

المصادر: خرائط جيولوجية لوحة القصير ١/٥٠٠,٠٠٠ ولوحة قنا ١/٢٥٠,٠٠٠



شكل (٨) سطح عدم توافق بين صخور ما قبل الكامبري والحجر الرملي الكريتاسي

رابعاً: نتائج الدراسة:

ركزت الدراسة الحالية على رصد وتفسير ظاهرات تجوية الصخور الرسوبية والنارية والمتحولة في ثلاثة مواقع من منطقة الدراسة على النحو التالي:

١. موقع ١ وادي أم حماد ($26^{\circ} 06' 07''$ شمال $34^{\circ} 03' 22,8''$ شرق):

يتمد موقع (١) على الحافة الجنوبية المحددة للمجرى الرئيسي لوادي أم حماد، على مسافة ١٩,٨ كم من مدخل طريق القصير - فقط (شكل ٧). ويظهر على جانب الوادي تل منعزل من صخور الحجر الرملي الكريتاسي، توجد قمته على منسوب ١٨ متر بالنسبة لقاع وادي أم حماد (شكل ٩).

يتميز تل الحجر الرملي بتفكك واضح في بنية الصخور؛ حيث يتألف في الأساس من جلاميد متجمعة ومتراكمة على جانب المنحدر، تتوزع في مدى حتمي واسع (جدول ٢). وهنا يشمل مصطلح الجلاميد كل الصخور التي يتراوح طول محورها ما بين ٢٥ سم و ٤٠٩ سم وما يزيد عن ذلك يدخل في فئة تصنيف الكتل الصخرية^(٤٣).

وقد لعبت حركة المواد على المنحدر مع التجوية دوراً في تطور تلك الظاهرة، فقد أمكن الاستدلال على طبيعة حركة بعض الجلاميد الكبيرة جداً والكتل الصخرية بالإنزلاق أو الانقلاب من خلال فحص لون سطح الجلاميد؛ حيث تتميز أسطح الجلاميد المنزقة بلون داكن لصبغة التجوية patina نتيجة لإنكشاف السطح وتعرضه للتجوية على مدى زمني طويل، في حين تتميز أسطح الجلاميد المنقلبة بلون فاتح نسبياً أقرب إلى درجة لون الصخر الأم غير المجوى (شكل ٩).

وقد تم رصد مجموعة من فجوات التافوني الكبيرة في الواجهات الصخرية للجلاميد والكتل الصخرية، والتي تتراوح أقطارها بين ٠,٧ و ١,٨ متر. ولوحظ وجود علاقة واضحة بين وجود بعض الفجوات والبنى المتقاطعة المميزة لصخر الحجر الرملي (شكل ١٠ أ). وتحتوي أرضية أكبر الفجوات على حطام صخري (في حجم الجلاميد الصغير والحصى حاد الزوايا) من نواتج عملية تجويف الصخر بالتجوية (شكل ١٠ ب).

وقد تراوحت متوسطات قراءات مطرقة شميت من صخور الحجر الرملي المجواه ما بين ١١,٦ و ١٥,٤. ويمكن مقارنة تلك القيم المنخفضة نسبياً مع قراءات متنوعة من صخور الحجر الرملي حول العالم. فعلى سبيل المثال تراوحت قيم رد فعل المطرقة من صخور الحجر الرملي غير المجواه ما بين ٥٠,٨^(٤٤) و ٥٩^(٤٥). وقد بلغت قيمة رد فعل المطرقة من صخور الحجر الرملي

الكريتاسي غير الجواه في منطقة الدراسة ٤٦,٩ بالتطبيق على مكشف صخري في وادي أم حماد بعد تنظيف السطح جيداً، وذلك باستخدام حجر الطحن لإزالة أي آثار للتجوية والتي من شأنها أن تؤثر على القراءات.

وعند حضيض تل الحجر الرملي في موقع (١) أمكن رصد موضع الاتصال الصخري بين بقايا صخور الحجر الرملي الكريتاسي وبقايا الصخور المتحولة عن أصل رسوبي metasediment من عمر ما قبل الكامبري. وتوجد صخور الحجر الرملي متجدرة في الأرض بأبعاد ٢٠ سم^٣ و ٣٠ سم^٣، ويحيط بها غطاء كثيف من مفتتات وشظايا صخور ما قبل الكامبري حادة الزوايا (شكل ١١) و(شكل ١٢). ويعبر هذا المظهر عن حالة تجوية شديدة وتفكك تام لصخور ما قبل الكامبري على سطح الأرض.



شكل (٩) مجسم ثلاثي الأبعاد لتل من الحجر الرملي الكريتاسي، موقع (١)

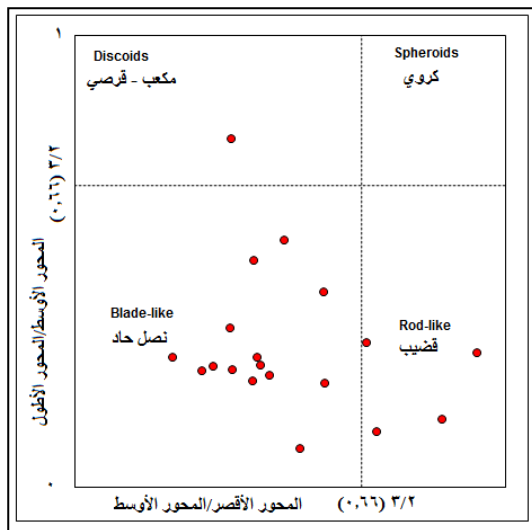
١: كتلة صخرية منزلقة على المنحد ٢. جلاميد صخرية منقلبة على المنحد ٣. كتلة صخرية متجدرة في الأرض



(أ) تكون التافوني في واجهة كتلة صخري
(ب) لاحظ تراكم نواتج التجوية
شكل (١٠) فجوات التافوني، موقع (١)



شكل (١١) تجوية صخور متحولة من أصل رسوبي، موقع (١)



شكل (١٢) تحليل شكل الحصى المجوى

جدول (٢) قياسات نواتج التجوية من صخور الحجر الرملي الكريتاسي، موقع (١)

ملاحظات	فئة الحجم	المحور الأطول (متر)	مسلسل
تكون فجوات التافوني في واجهة الصخر	كتلة صخرية	٦,٣٨	١
حركة على المنحدر بالانزلاق	جلاميد خشن جداً	٣,١٨	٢
حركة على المنحدر بالانزلاق	جلاميد خشن جداً	٢,٤٦	٣
حركة على المنحدر بالانزلاق	جلاميد خشن جداً	٢,٣٩	٤
حركة الملمود الصخري منقلباً	جلاميد خشن جداً	٢,٣١	٥
حركة على المنحدر بالانزلاق	جلاميد خشن	١,٥٣	٦
حركة الملمود الصخري منقلباً	جلاميد خشن	١,٤٢	٧
حركة الملمود الصخري منقلباً	جلاميد خشن	١,٣٤	٨
نواتج التجوية عند حضيض التل	جلاميد متوسط	٠,٥٢	٩
نواتج التجوية عند حضيض التل	جلاميد صغير	٠,٣٦٢	١٠
نواتج التجوية عند حضيض التل	جلاميد صغير	٠,٢٩٨	١١
نواتج التجوية عند حضيض التل	جلاميد صغير	٠,٢٩٥	١٢
نواتج التجوية عند حضيض التل	جلاميد صغير	٠,٢٨١	١٣
نواتج التجوية عند حضيض التل	جلاميد صغير	٠,٢٨	١٤
نواتج التجوية عند حضيض التل	جلاميد صغير	٠,٢٧٢	١٥
نواتج التجوية عند حضيض التل	حصى كبير جداً	٠,٢٤٨	١٦
نواتج التجوية عند حضيض التل	حصى كبير جداً	٠,٢٣٥	١٧
نواتج التجوية عند حضيض التل	حصى كبير جداً	٠,٢٢٢	١٨

مصدر القياسات: صور مصححة باستخدام المساحة التصويرية من مدى قريب

٢. موقع ٢ وادي أم حماد (٧،٤٨،٠٦' ٢٦° شمال ٥،١،٠٢' ٣٤° شرق):
يمتد موقع (٢) شمال غرب موقع (١) بـ ٣,١ كم، على الجانب الشمالي لطريق القصير-
قفط، والممتد في أحد روافد المجرى الرئيسي لوادي أم حماد (شكل ٧). وقد ركزت الدراسة في
الموقع على كتلتين من صخور الأنديزيت المتحولة من عمر ما قبل الكمبري meta-
andesite (كتلتي ٢-أ، ٢-ب).

تنتشر نواتج عملية التجوية الميكانيكية حول الكتلة (٢-أ)، في مدى حتمي متباين
يشمل رواسب الطين والرمل والحصى وبعض من الجلاميد الصغيرة. ويتميز غالبية الحصى الكبير
والجلاميد بشكل أقرب ما يكون إلى المكعب حاد الزوايا، نتيجة لتجوية الصخر الأم تحت تأثير
التقطع بالفواصل البنيوية (شكل ١٣). وتمثل قشرات التجوية flakes سمة مميزة لبنية الكتلة (٢-
ب)، وتتميز بضعف تماسكها بشكل عام، حيث يمكن إقتلاعها من الصخر بسهولة باستخدام
الشاكوش الجيولوجي أو بأصابع اليد (بالنسبة للأحجام الصغيرة منها)، (شكل ١٤). وقد بلغ
متوسط قراءات مطرقة شميت من الكتلتين (٢-أ) و(٢-ب) ١٥,٤ و ١٣,٦ على التوالي، وتتفق
تلك القيم مع درجة التجوية الرابعة (درجة تجوية عالية) طبقاً لتصنيف تجوية الصخور البركانية
الحامضية (جدول ١). كما يقدر المحتوى النسبي لمعدن الكلورايت (من قشرة صخرية مجواه من
الكتلة ٢-ب) بـ ٨ % ويمثل معدن الكلورايت أحد المعادن الطينية الدالة على التجوية
الكيميائية للصخور النارية والمتحولة.



شكل (١٣) التفكك الكتلي لصخور الأنديزيت المتحولة تحت تأثير التقطع البنيوي للصخر، كتلة
٢-أ، موقع (٢)



شكل (١٤) تورق صخور الأنديزيت المتحولة، كتلة ٢-ب، موقع (٢)

لاحظ استخدام مطرقة شमित في وضع رأسي
لاحظ السهم يشير الى تفكك بعض قشرات التجوية وانفصالها عن الكتلة الصخرية

وفي جوار الموقع أمكن رصد تتابع رواسب الوادي على امتداد حفر اصطناعي بعمق مترين تقريباً (شكل ١٥). وتتألف رواسب حشو الوادي من خليط من مفتتات صخور نارية ومتحولة ورسوبية مع سيادة رواسب تجوية حصوية وحادة الزوايا على طول الحفرة. ومن ثم يعد ذلك مؤشراً على استيعاب الوادي لنواتج التجوية المتراكمة على مدى زمني طويل.



- ١: رمل خشن وحصي صغير متوسط الاستدارة
- ٢: رمل خشن وحصي خشن حاد الزوايا
- ٣: رمل خشن وحصي صغير الى متوسط حاد الزوايا
- ٤: حصي خشن جدا حاد الزوايا

شكل (١٥) مكشف رواسب الوادي، موقع (٢)

يوجد موقع (٣) على مسافة ٥٤,٧ كم من مدخل طريق القصير- قفط، وترجع تسمية الموقع نسبة إلى وادي أبو زيران (شكل ٧). وقد تركزت الدراسة في موقع (٣) على صخر الجرانوديوريت، ويعد هذا الصخر الأوسع انتشارًا من ضمن مجموعة الصخور الجرانيتية المنكشفة في منطقة أبو زيران. ويتميز صخر الجرانوديوريت بلون رمادي فاتح ونسيج حبيبي خشن، ويتأثر الصخر في منطقة الدراسة بنظام فواصل بنيوية في اتجاهات غرب - شرق، وشمال غرب - جنوب شرق، وشمال شمال شرق-جنوب جنوب غرب^(٤٦). ويصنف جرانوديوريت أبو زيران ضمن مجموعة الجرانيت الأقدم في الصحراء الشرقية.

وتمثل التلال المتخلفة toirs ظاهرة جيومورفولوجية مميزة في منطقة أبو زيران. وقد تناولت الدراسة الحالية أحد تلال الجرانوديوريت في موقع (٣) والذي ترتفع قمته ٣,٧ متر عن سطح الأرض المجاور. ويتكون هذا التل من بعض الكتل الصخرية المتحدرة مع الصخر الأم ومن أبرزها كتلة بارزة ذات سطح قبايبي مميز يبلغ قطرها ٢,٦ متر (شكل ١٦). وتعد الكتل القبايبي المستديرة علامة مميزة لأسطح الجرانيت، وتتطور تلك الكتل بفعل التجوية تحت السطحية حيث تعمل حركة المياه على تهذيب جوانب الكتل المكعبة والمقطعة بالفواصل البنيوية^(٤٧). كما تتفكك الطبقة الخارجية من القبة الصخرية المنكشفة بالتقشر exfoliation مكونة راقات طبقية الشكل بسمك بضعة سنتيمترات (شكل ١٧). كما أمكن تمييز عملية التفكك الكتلي للصخر بفعل عمليات التجوية مع وجود دور رئيسي لتقطع الصخر بالفواصل البنيوية. وقد تتفكك الكتلة الصخرية الواحدة إلى جزئين أو أكثر مع وجود الصخور متجمعة، ومع استمرار عمليات التجوية السطحية قد تتفكك تلك الكتل بشكل تام في حجم الحصى والجلاميد الصغير (شكل ١٦).



شكل (١٦) تل من صخور الجرانوديوريت في وادي أبو زيران، موقع (٣)

١: قبة صخرية ٢: تفكك جزئي للصخر ٣: تفكك تام للصخر في حجم الحصى والجلاميد الصغير



شكل (١٧) تقشر الجرانوديوريت في وادي أبو زيران، موقع (٣)

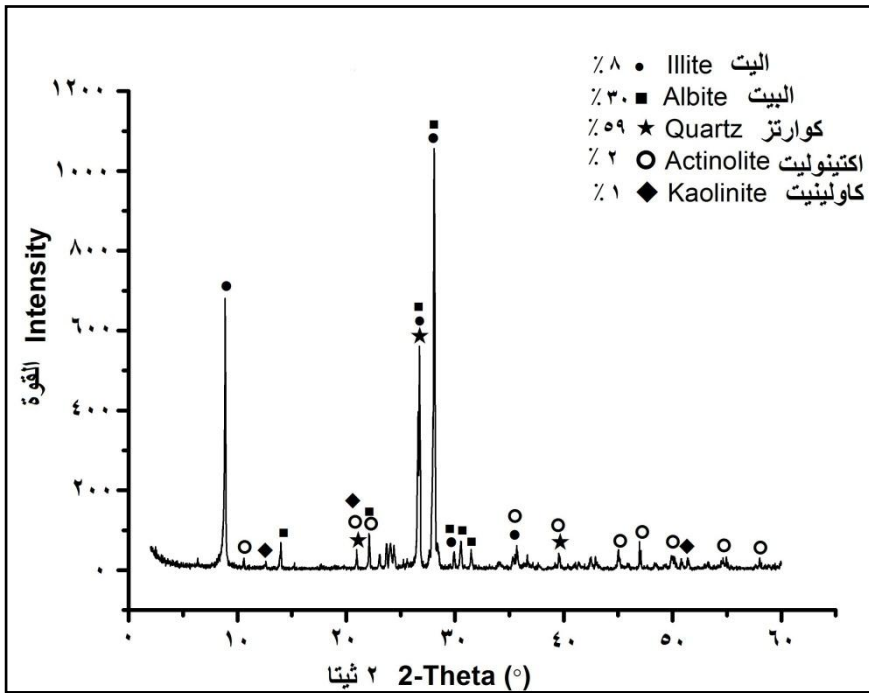
تراوح متوسط قراءات مطرقة شميت من سطح قبة الجرنوديوريت المعرضة للتقشر ما بين ١٣,٦ و ١٤,٢. وتعد تلك القيم منخفضة نسبيًا وتعبر عن مدى تأثر الصخر بالتجوية مقارنة بقراءات رد فعل مطرقة شميت (من نوع N) من الصخور الجرانيتية حول العالم، مع الأخذ في الاعتبار مدى تأثر الصخور بالتجوية؛ حيث تتراوح قراءات المطرقة من الصخور الجرانيتية الغير بجواه ما بين ٥٥,٧ و ٦٣,٣^(٤٨)، وتبلغ أقصاها ٧٣,٤ من جرانيت أو كلاهوما في الولايات المتحدة^(٤٩). وتنخفض القراءات بالتطبيق على الجرانيت المحوى من جزيرة كاليفاريا جنوب إيطاليا لتتراوح ما بين ١٧,٨ و ٣٧,٨ وقد تفاوتت القراءات حسب درجة تأثر الصخر بالتجوية^(٥٠).

وقد تناولت دراسة (Abdel-Ghaffar (2010 بتوجرافية صخر الجرانوديوريت في منطقة أبوزيران؛ حيث يتألف الصخر من معادن أولية مثل البلاجيوكليز والكوارتز والفلسبار البوتاسي (الأورثوكليز) والبيوتيت والهورنبلند مع تواجد لبعض المعادن الثانوية مثل الأبيدوت والألنيت وأكسيد الحديد والكاولينيت (شكل ١٨). ويتفق ماورد مع نتيجة التحليل المعدني XRD لعينة قشرة تجوية من القبة الصخرية في الموقع (٣)؛ حيث يظهر من التحليل إحتواء العينة على معدني الكوارتز والألبيت (بلاجيوكليز) ضمن المعادن الأولية المكونة للصخر (شكل ١٩). كما يظهر تحليل XRD وجود بعض المعادن الطينية (الثانوية) مثل الأليت والكاولينيت، تلك المعادن الدالة على تغيير المعادن الأولية للصخور الجرانيتية تحت درجات تجوية مختلفة (جدول ٣).



شكل (١٨) الفحص المجهرى للجرانوديوريت، منطقة أبو زيران

المصدر: Abdel-Ghaffar, 2010



شكل (١٩) المحتوى المعدني لعينة قشور الجرانودايورايت بتطبيق تقنية XRD

تم تحليل العينة في المعامل المركزية لهيئة الثروة المعدنية بالقاهرة

جدول (٣) العلاقة ما بين المعادن الأولية المكونة للصخور الجرانيتية والمعادن الطينية الثانوية ودرجة التجوية الكيميائية (التحلل المائي)

معادن ثانوية			معادن أولية
تجوية قوية جدا	تجوية قوية	تجوية ضعيفة الى متوسطة	
جبسيت Gibbsite	الكاولينيت Kaolinite	السمكتيت Smectite	الألبيت Albite
جبسيت Gibbsite	الكاولينيت Kaolinite	الآليت Illite	الأورثوكليز Orthoclase
جبسيت Gibbsite	الكاولينيت Kaolinite	الآليت Illite	مسكوفيت Muscovite
جبسيت Gibbsite	الكاولينيت - جيوتيت Kaolinite	فيرميكوليت Vermiculite	البيوتيت Biotite
جبسيت Gibbsite	الكاولينيت - جيوتيت Kaolinite	السمكتيت Smectite	الهورنبلند Hornblende

المصدر: Migon, 2006

رابعاً: خاتمة:

تعد التجوية واحدة من أعم عمليات تشكيل سطح الأرض، وينتج عنها العديد من أشكال سطح الأرض في مستويات حجمية متنوعة. كما تمثل مصدراً رئيسياً للإمداد بالرواسب والمفتتات الصخرية. ويتوقف فعل التجوية على العديد من العوامل مثل نوع الصخر وبنيته وعمر انكشاف الصخر فضلاً عن الظروف البيئية السائدة (خاصة مايتعلق بالحرارة والرطوبة). وتمثل

العديد من التقنيات الحديثة ركيزة أساسية في إجراء بحوث التجوية، تلك التقنيات المنبثقة عن تخصصات متنوعة من علوم الأرض مثل الجيولوجيا الهندسية والمعادن والجيوفيزياء والمساحة. وقد تناولت الدراسة الحالية أهم التقنيات المستخدمة في مجال بحوث التجوية.

وقد أمكن تطبيق تلك التقنيات في رصد وتفسير أشكال التجوية من ثلاثة مكاشف صخرية على جانبي طريق القصير-قفط، تشمل: صخور الحجر الرملي الكريتاسي والصخور المتحولة في وادي أم حماد وصخر الجرانوديورايت في وادي أبو زيران. وقد خلصت الدراسة إلى تعرض الصخور في منطقة الدراسة إلى درجات متفاوتة من عمليات التجوية، مع المقارنة بالدراسات السابقة التي تناولت التصنيف الكمي لدرجات التجوية. وقد أمكن تمييز أنماط تفكك وتجوية الصخور في مواقع الدراسة حسب نوع وبنية الصخور مثل فجوات التافوني في صخور الحجر الرملي الكريتاسي (موقع ١) وتورق صخور الأنديزيت المتحولة (موقع ٢) فضلاً عن أنماط التفكك الكتلي لصخر الجرانوديورايت (موقع ٣). وقد أفادت عملية التحليل المعدني XRD في تقصى أثر عملية التجوية الكيميائية على صخور الجرانوديورايت مع الأخذ في الاعتبار دراسة بتوجرافية سابقة على نفس نوع الصخر في منطقة الدراسة.

الهوامش:

-
- 1 (Hack, 2020)
 - 2 (Dixon, 2004)
 - 3 (Hack, 2020)
 - 4 (Smith, 2009)
 - 5 Cooke et al., 1993)
 - 6 (Turkington and Paradise, 2005)
 - 7 (Turkington, 2004)
 - 8 (Turkington, 2004; Ward, 2004)
 - 9 (Goudie, 2004)
 - 10 (Migon, 2004)
 - 11 (Twidale, 1993; Migon 2006)
 - 12 Migon, 2004; Migon 2006)
 - 13 (Migon 2006)
 - 14 (ICOMOS ISCS, 2008)
 - 15 (Moses et al., 2014)
 - 16 (Dewitt and Wilf, 2000)
 - 17 (Westoby et al., 2012; Smith et al., 2016)
 - 18 (Sturzenegger and Stead, 2009)
 - 19 (Casella et al., 2014)
 - 20 (Ebrahim, 2011)

-
- 21 (Mol and Clarke, 2019)
- 22 (Smith et al., 2016)
- 23 (Westoby et al., 2012)
- 24 (Smith et al., 2016)
- 25 (Mol and Clarke, 2019; Smith et al., 2016; Fonstad et al., 2013)
- 26 (Mol and Clarke, 2019)
- 27 (Hack, 2020)
- 28 (Goudie, 2006)
- 29 (Aydin and Basu, 2005; Aydin, 2009)
- 30 (Katz et al., 2000)
- 31 (Goudie, 2006)
- 32 (Viles et al., 2011)
- 33(Aoki and Matsukura 2007; Viles et al., 2011)
- 34 (Katz et al., 2000)
- 35 (Migon, 2006)
- 36 (Smith, 2009)
- 37 (Arikan et al., 2007)
- 38 (Hack, 2020)
- 39 (Abdel-Rahman, 1995)
- 40 (El-Ramly, 1972)
- 41 (Abdel-Rahman, 1995)
- 42 (Said, 1962)
- 43 (Blair and Mcpherson, 1999)

44 (Katz et al., 2000)

45 (Whipple et al., 2000)

46 (Abdel-Ghaffar, 2010)

47 (Migon, 2004)

48 (Kahraman et al., 2002)

49 (Katz et al., 2000)

50 (Le Pera and Sorriso-Valvo, 2000)

المراجع:

- 1- Abdel-Ghaffar, I. N., 2010. Geological and Petrological Studies of some Granitic Rocks and their Economic Aspects Using Remote Sensing and GIS Techniques in the Central Eastern Desert, Egypt. PhD, Faculty of Science, Ain Shams Univ., Cairo.
- 2- Abdel-Rahman, M., 1995. Tectonic -magmatic stages of shield evolution: the Pan- African belt in northeastern Egypt. Tectonophysics. 242, 223-240.
- 3- Aoki, H., Matsukura, Y., 2007. A new technique for non-destructive field measurement of rock-surface strength: an application of the Equotip hardness tester to weathering studies. Earth Surf. Process. Landforms. 32, 1759-1769.
- 4- Arikan, F., Ulusay, R., Aydin, N., 2007. Characterization of weathered acidic volcanic rocks and a weathering classification based on a rating system. Bull Eng Geol Environ. 66, 415-430.
- 5- Aydin, A., 2009. ISRM suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: revised version. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 46, 627-634.
- 6- Aydin, A., Basu, A., 2005. The Schmidt hammer in rock material characterization. Engineering Geology. 41, 1211-1214.

7- Blair, T., Mcpherson, J., 1999. Grain-size and textural classification of coarse sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Research*. 69, 6-19.

8- Casella, E., Rovere, A., Pedroncini, A., Mucerino, L., Casella, M., Cusati, L., Vacchi, M., Ferrari, M., Firpo, M., 2014. Study of wave runup using numerical models and low-altitude aerial photogrammetry: a tool for coastal management. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 149, 160-167.

9- Cooke, U., Warren, A., Goudie, A., 1993. *Desert geomorphology*. London: UCL Press.

10- Dewitt, B., Wolf, P., 2000. [Elements of photogrammetry \(with applications in GIS\), 3rd edition](#), McGraw-Hill Higher Education.

11- Dixon, J., 2004. Weathering, in *Encyclopedia of Geomorphology* (Editor Goudie, A.). Routledge Taylor and Francis. pp. 1108-1112.

12- Ebrahim, Mostafa., 2011. Using Close Range Photogrammetric techniques as 3D source for Egyptian monument information system. *International Journal of Geoinformatics*. 7(3), 15-22.

13- El-Ramly, M. F., 1972. A new geological map for the basement rocks in the Eastern Desert and South Western parts of Egypt, scale 1: 1000 000. *Annals of the Geological Survey of Egypt*. 2, 1-18.

14- Fitzner, B., Heinrichs, K., La Bouchardiere, D., 2003. Weathering damage on Pharaonic sandstone monuments in Luxor-Egypt. *Building and Environment*. 38, 1089-1103.

15- Fonstad, M., Dietrich, J., Courville, B., Jensen, J., Carbonneau, P., 2013. Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. *Earth Surf. Process. Landforms*. 38, 421-430.

16- Goudie, A., 2004. Honeycomb weathering, in *Encyclopedia of Geomorphology* (Editor Goudie, A.). Routledge Taylor and Francis. p. 530.

17- Goudie, A., 2006. The Schmidt Hammer in geomorphological research. *Progress in Physical Geography*. 30, 1-16.

18- Hack, H., 2020. Weathering, erosion and susceptibility to weathering, in *Soft Rock Mechanics and Engineering*. 1st ed., Ch. 11. (Editors Kanji, M., He, M., Ribeira E Sousa, L.). Springer Nature. pp. 291-333.

19- ICOMOS-ISCS (International Scientific Committee for Stone) (Vergès-Belmin), 2008. Illustrated glossary on stone deterioration patterns. *Monuments and Sites XV*, ICOMOS, Paris.

20- Kahraman, S., Fener, M., Gunayidin, O., 2002. Predicting the Schmidt hammer values of in-situ rock from core sample values. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 39, 395-99.

-
- 21- Katz, O., Reches, Z., Roegiers, J., 2000. Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt Hammer. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 37, 723-28.
- 22- Le Pera, E., Sorriso-Valvo, M., 2000. Weathering and morphogenesis in a mediterranean climate, Calabria, Italy. *Geomorphology*. 34, 251-270.
- 23- Matsukura, Y., Matsuoka, N., 1996. The effect of rock properties on rates of tafoni growth in coastal environments. *Zeitschrift für Geomorphologie Supplementband*. 106, 57-72.
- 24- Migon, P., 2004. Granite geomorphology, in *Encyclopedia of Geomorphology* (Editor Goudie, A.). Routledge Taylor and Francis. pp. 490-493.
- 25- Migon, P., 2006. *Granite Landscapes of the World*. Oxford University Press.
- 26- Mol, L., Clarke, I., 2019. Integrating structure-from-motion photogrammetry into rock weathering field methodologies. *Earth Surf. Process. Landforms*. 44, 2671-2684.
- 27- Moses, C., Robinson, D., Barlow, D., 2014. Methods for measuring rock surface weathering and erosion: a critical review. 135, 141-161.
- 28- Said, R. (1962) *The geology of Egypt*. Elsevier Publishing Co. Amsterdam.

29- Smith, B., 2009. Weathering Processes and Forms, in *Geomorphology of Desert Environments* 2nd ed, Ch. 4. (Editors Parsons, A., Abrahams, A.). Springer. pp. 69-100.

30- Smith, M., Carrivick, J., Quincey, D., 2016. Structure from motion photogrammetry in physical geography. *Progress in Physical Geography*. 40 (2), 247-275.

31- Sturzenegger, M., Stead, D., 2009. Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. *Engineering Geology*. 106, 163-182.

32- Turkington, A., 2004. Cavernous weathering, in *Encyclopedia of Geomorphology* (Editor Goudie, A.). Routledge Taylor and Francis. pp. 128-130.

33- Turkington, A., Paradise, T., 2005. Sandstone weathering: a century of research and innovation. *Geomorphology*. 67, 229-253.

34- Twidale, C., 1993. The research frontier and beyond: granitic terrains. *Geomorphology*. 7, 187-223.

35- Viles, H., Goudie, A., Grab, S., Lalley, J., 2011. The use of the Schmidt Hammer and Equotip for rock hardness assessment in geomorphology and heritage science: a comparative analysis. *Earth Surf. Process. Landforms*. 36, 320-333.

36- Ward, S., 2004. Tafoni, in *Encyclopedia of Geomorphology* (Editor Goudie, A.). Routledge Taylor and Francis. pp. 1034-1035.

37- Westoby, M., Brasington, J., Glasser, N., Hambrey, M., Reynolds, J., 2012. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*. 179, 300-314.

38- Whipple, K., Snyder, p., Dollenmayer, K., 2000. Rates and processes of bedrock incision by the Upper Upak River since the 1912 Novarupta ash flow in the Valley of Ten Thousand Smokes, Alaska. *Geology*. 28, 835-38.