جيومورفولوجية حفر التافونى على الحافة الشرقية لنهر النيل شرق مدينة المنيا - مصر

د. سيد محمود مرسى سعيد

أستاذ مساعد – قسم العلوم الإنسانية –

كلية الآداب والعلوم – جامعة قطر

ssaid@qu.edu.qa

الإستشهاد المرجعى:

سيد محمود مرسى(٢٠٢٠). جيومورفولوجية حفر التافونى على الحافة الشرقية لنهر النيل شرق مدينة المنيا - مصر. ـ حولية كلية الآداب. جامعة بني سويف. ـ مج ٩ ، ج ٢ . ـ ٢٨٥ : ٣٥٦

مستخلص:

تُعرف حفر التافوني بعدة طرق منها: اختلافات فى الشكل، ونوع الصخر، وآليات التشكيل. وتدرس هذه الدراسة حفر التافوني كإحدى ظاهرات التعرية الهوائية فى الصخور الكربونية بالزمن الرابع؛ لإعطاء تعريف أفضل لهذا المصطلح. تختلف حفر التافوني الكبيرة عن حفر التافوني الصغيرة وذلك عن طريق استخدام التحليل المورفومتري. تنمو حفر التافوني الصغيرة بمعدل ١٧ سم٣ / السنة، وقد تشكل حفر التافوني الأكبر التي يبلغ معدل نموها ٤٥ سم ٣ /

السنة. ساعد التحليل البتروجرافي فى تحديد آليات تشكيل حفر التافوني. كشفت النتائج أنه لا توجد حاليًا متبخرات. وتسخدم إزالة البلورات الملحية كآلية تشكيل، بينما يُعد نحت الرياح الآلية الأساسية فى تشكيلها.

الكلمات المفتاحية: حفر التافوني، الكهوف، أقراص العسل، التحليل المورفومتري، التحليل الإحصائي.

Abstract:

Tafoni have been confusingly defined in many ways: variations in size, rock type, and forming mechanisms. This study addresses tafoni in Quaternary eolian carbonates to help better define the term. Large tafoni were differentiated from Small tafoni, using morphometric analyses. Small tafoni show a growth rate 17 cm3/yr; and may to form larger tafoni, which grew at 45 cm3/yr. Petrographic analysis helped identify tafoni-forming mechanisms. Results revealed no evaporites present, removing crystal wedging as a mechanism, while indicating wind erosion as the primary mechanism.

Keywords: Tafoni, Caves- Honey comp- Morphometric Analysis- Statistical Analysis.

مقدمة:

تُعد ظاهرة حفر التافونى من الظاهرات الجيومورفولوجية المهمة والتي لم تلق اهتمامًا كبيرًا من الباحثين. وعن أصل ونشأة حفر التافوني فإن حفر التافوني Tafoni هو الاسم الجمع والصفة؛ أما Tafone هو الاسم المفرد للكهف المفرد. وفي بعض الأحيان يُطلق اسم Tafoni على حفر التافوني المتعددة.

أصل كلمة تافوني غير معروف، ولكن لها أصول البحر الأبيض المتوسط. حيث قد تتبع كلمة تافوني من الكلمة اليونانية taphos وتعني القبر tomb. وربما تتبع من الكلمة الفرنسية tafoni وتعني النوافذ، أو من كلمة tafonare الفرنسية وتعني ثقوب perforate بالإنجليزية، وفي صقلية tafoni تعني النوافذ (Goudie, A., 2003) .

يُشتق المصطلح من كلمة تافونار "tafonare" أي تعني مثقبة; المصطلح شكلي فى الأصل وليس مبني على التكوين (Wilhelmy 1981, in Rögner, 1988).

وتوجد تعريفات مختلفة لمصطلح حفر التافونى. حيث يُعرف المُعجم الجيولوجى حفر التافونى (تا–فو–نى) Ta,Fo.Ne على إنها:

(أ) مصطلح يُستخدم للتعبير عن التجاويف الطبيعية فى تركيب أقراص العسل، والتي شُكلت بواسطة عمليات التجوية في تجويف أوجه الجروف في الأقاليم الجافة، أو على طول أرصفة الشاطئ. وقد يصل عمق الحفرة نحو ١٠ سنتيمتر، وتتشكل كنتيجة لإذابة الأملاح الحرة في الصخور البلورية بعد التسخين بفعل الإشعاع الشمسى. وطبقًا لذلك فإن المُعجم الجيولوجى يُعرف حفر التافونى على إنها تلك الحفر التي يبلغ عمقها ١٠ سنتيمتر، على أيه حال، حجم حفر التافوني الذي دُرسَ في الدراسة الحالية متغير تمامًا.

(ب) مصطلح يُستخدم للتعبير عن تجويف الكتل أو الصخور الجرانيتية التي اقتلعت خارجًا بواسطة التجوية التكهفية (Neuendorf, et al., 2005, p. 655). وبعد هذا التعريف الثاني الوارد في المعجم الجيولوجي، يمكن اعتبار أن حفر التافونى تحدث فقط في الصخور الجرانيتية أو الصوانية، ومع ذلك، تم استخدام مصطلح التافونى tafone(i) لوصف الفتحات الناتجة عن التجوية في الحجر الرملي، والحجر الجيرى، والغرين، والبريشيا، والطوفا، والدولوميت (Twenhaile, A. S., 1992). وتؤكد الدراسة الحالية حدوث حفر التافوني فى صخور الحجر الجيري على الحافة الجيرية الشرقية لنهر النيل شرق مدينة المنيا.

تقدم الدراسة الحالية مقارنات كثيرة لتعريف حفر التافوني، ويكون الاختلاف فى المصطلحات من حيث الشكل وحجم التجويف، وآلية التكوين، والاتجاه، والمناخ، ونوع الصخر. وقد أعطت الاختلافات وصفًا بأن حفر التافوني تم تشكيلها بواسطة التجوية التكهفية، ويظهرون لمقابلة تعريف الكارست الكاذب pseudo karst أو الزائف، "وهي عبارة عن تضاريس الكارست مثل المنخفضات المغلقة، الأودية الغائرة، والكهوف، ولكن نتجت بواسطة عمليات أخرى غير إذابة الصخور (Neuendorf,et al.,2005,p. 523).

وبالنسبة للدراسة الحالية، فإنه يُمكن تعريف حفر التافوني على إنها حُفر أو فتحات ريحية نتجت بفعل نحت الرياح فى الصخور الجيرية ذات شكل مقعر وغير منتظمة الشكل إلى حد ما ويبرز سقفها فى صورة صخور بارزة أو سقف معلق، والتي هى نتيجة لبعض آليات التجوية.

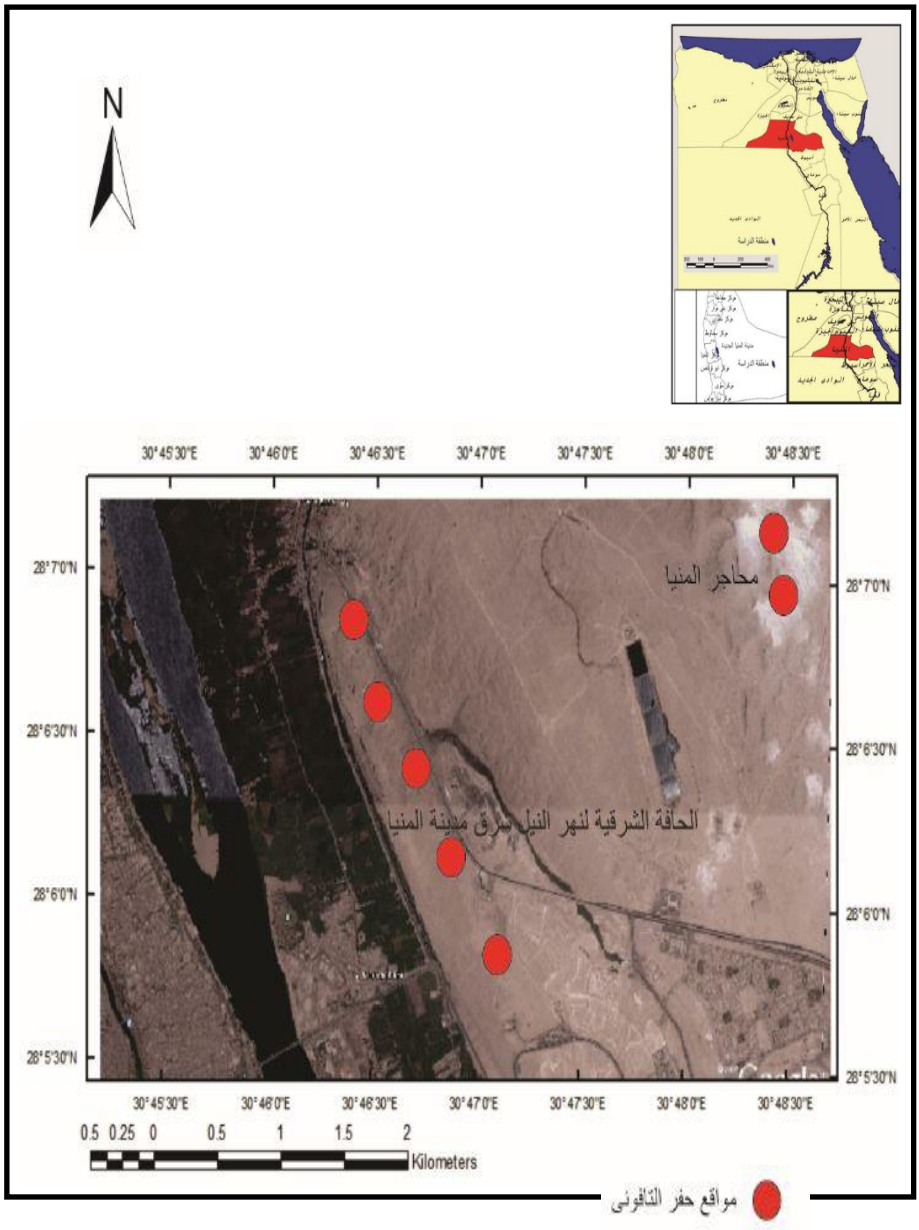
حدود منطقة الدراسة:

تمتد منطقة الدراسة التي تنتشر بها حفر التافوني شرق النيل بين دائرتي عرض ً ٢١ َ ٠٣ ْ ٢٨ و ً ٣٧ َ ٠٧ ْ ٢٨ شمالاً وخطي طول ً ٥١ َ ٤٥ ْ ٣٠ و ً ١٩ َ ٥٠ ْ ٣٠ شرقًا. وتبلغ مساحتها ٢٧ كم مربع ومحيطها ٢٢ كم.

يحد محافظة المنيا شكل (١) هضبيتين إحداهما تقع شرق وادي النيل والأخرى غرب وادي النيل. وتتمثل الهضبه الشرقية التي تنتشر على حافتها حفر التافوني موضوع الدراسة الحالية في التكوينات الجيرية الواقعة على الجانب الشرقى للنيل، والتي تمثل جزء من هضبه المعازة الجيرية التي تمتد من ثنية قنا جنوبًا حتى جبل المقطم شمالاً وتقترب بحافات شديدة الانحدار من السهل الفيضي لوادي النيل في معظم الأجزاء وتبتعد عنها نسبيًا في بعض المواضع، خاصة عند مصبات الأودية التي تقطعها لتصب في نهر النيل غربًا. وتتميز حافة هذه الهضبه في محافظة المنيا بالتباين الكبير في الارتفاع وشدة الانحدار حيث يزيد الارتفاع عن ١٨٠م في معظمها، كما تتميز الحافة بملاصقتها للسهل الفيضى. وقد زاد ارتفاع

الحافة الشرقية من قوة اصطدام الرياح بالحافة الشرقية الأمر الذي أدى إلى تشكيل حفر التافوني على مناسيب مختلفة من الحافة.

تُعد منطقة الدراسة من المناطق الجافة. حيث إن فترة الجفاف الطويلة تسمح لمعظم الرطوبة الغنية بالأملاح على التركيز في الأجزاء المحمية من التجويف حيث يتم تكريس مزيد من التجوية التفاضلية. من ناحية أخرى، عندما تكون فترة التجفيف قصيرة حيث لا يجف السطح الصخرى بسهولة، وبالتالي سوف لا يتركز الملح فى الأجزاء المحمية الأكثر رطوبة. وبالنسبة لفترات التجفيف القصيرة فنجد أن الرطوبة الغنية بالأملاح ستتوزع بشكل أكثر انتظامًا عبر السطح الصخري بدلاً من أن تتركز في المناطق المحمية بشكل انتقائى، حيث إن الملح والعوامل الجوية تكون قادرة على التجوية الانتقائية وتوسيع الحفر.



الخريطة من إعداد الباحث باستخدام جوجل إرث وبرنامج ارك ماب

شكل (١) مواقع حفر التافوني على الحافة الشرقية لنهر النيل ومحاجر المنيا شرق مدينة المنيا

أهداف الدراسة:

تتمثل أهداف الدراسة الحالية فيما يلي:

- تحديد ما إذا كانت حفر التافوني تشكلت وتطورت فى صخور الحجر الجيري بمنطقة الدراسة.

- التعرف على الخصائص التفصيلية لحفر التافوني حيث إنها مهمة لتفسيرات المصطلح نفسه.

- اقتراح آليات تشكيل حفر التافوني.

ولتحقيق الأهداف السابقة فقد سعت الدراسة الحالية لاختبار الفرضيات التالية:

١- تتشكل حفر التافوني على الحافة الشرقية لنهر النيل شرق مدينة المنيا.

٢- حفر التافوني الكبيرة لا تختلف مورفومتريًا فى مختلف الصخور.

٣- تتباين مورفومترية حفر التافوني الكبيرة عن حفر التافوني الصغيرة.

٤- يرتبط تشكيل حفر التافوني كبيرة الحجم بتشكيل حفر التافوني صغيرة الحجم.

٥- يرتبط تشكيل حفر التافوني بالنمو البلورى للمعادن، وبطاقة الرياح وعمليات النحت الهوائية.

مناهج وأساليب ومصادر الدراسة:

ولتحقيق أهداف الدراسة واختبار فرضياتها، فقد اتبع الباحث بعض المناهج والأساليب والمصادر المتنوعة وتتلخص فيما يلي:

- مناهج الدراسة:

استخدم الباحث المنهج التاريخي في تتبع مراحل النمو والتطور المختلفة لحفر التافوني بمنطقة الدراسة. كما تم استخدام المنهج التجريبي لتقدير حجم الرواسب التي تم ازاتها من حفر التافوني لحساب معدل التآكل السنوى فى حفر التافوني. وأُستخدم المنهج الوصفي التحليلي؛ لوصف وتحليل الملامح العامة لحفر التافوني خاصة الملامح التي لا يمكن قياسها، ومحاولة إيجاد بعض مظاهر التشابة والاختلاف بينها، والتعرف على العوامل التي تؤثر على تشكل الظاهرة. بالإضافة إلى المنهج المقارن والذي أمكن من خلال إجراء مقارنة بين بعض خصائص حفر التافوني المنتشرة على الحافة الشرقية لنهر النيل ومحجر المنيا.

- أساليب الدراسة:

وتتمثل في: الأسلوب الإحصائي حيث تم استخدامه في تحليل نتائج القياسات المورفومترية لحفر التافوني، وإيجاد العلاقات الارتباطية بين الأبعاد المختلفة للظاهرة، والمعادلات الرياضية المرتبطة بالدراسة الحالية. كما تم استخدام

الأسلوب الكارتوجرافي لتمثيل موقع منطقة الدراسة، والأبعاد المختلفة لحفر التافوني من خلال الخرائط والأشكال البيانية.

- مصادر الدراسة:

تم الاعتماد على الدراسة الميدانية بصفة أساسية كمصدر رئيسي لدراسة الظاهرة محل الدراسة الحالية، وقد تم خلالها إجراء القياسات المورفومترية على العديد من حفر التافونى المختلفة الأشكال والأحجام، وجمع العينات لتحليلها، والتقاط بعض الصور الفوتوغرافية، وأُخذت القياسات المورفومترية باستخدام طريقة البوصلة والشريط. ولقد وجد الباحث صعوبة في الحصول على المرئيات الفضائية الدقيقة للمنطقة وإن وجدت فسوف لا يستطيع منها الباحث استخراج أهم متغير في أبعاد حفر التاتفوني وهو العمق؛ لذا فقد تم الاعتماد على الدراسة الميدانية لاستخراج كافة الأبعاد التفصيلية للظاهرة. كما تم الاعتماد على خريطة مصر الجيولوجية (لوحة بني سويف) مقياس ١: ٥٠٠٠٠٠، إلى جانب استخدام صور من جوجل ايرث بعد ربطها ببرنامج GIS Map Arc. وتم الرجوع إلى بعض المراجع الأجنبية التي تناولت دراسة الظاهرة من قرب أو بُعد حيث لم تتوفر دراسة عربية واحدة تتناول بالتفصيل ظاهرة حفر التافوني في مصر.

- تقنيات البحث:

سُجلت المواقع العامة لحفر التافونى بواسطة جهاز GPS. وقد تم جمع نقاط GPS لكل كهف لتستخدم في مسح الكهف. وتم رسم إحداثيات GPS في برنامج ArcGIS بهدف المقارنة بين مواقع حفر التافونى بالنسبة لبعضها البعض، فضلاً عن أنها توفر التمثيل العام لتوزيع كهوف التافونى على الحافة الشرقية لنهر النيل. كما تم إنشاء خرائط لكهوف حفر التافونى شكل (٦)، وذلك باستخدام طريقة الشريط والبوصلة. والقياسات شملت قياس الزاوية الأفقية للكهف، والانحدار، بالإضافة إلى قياس أقصى عرض وارتفاع وعمق لكل حفر التافونى.

تم معالجة البيانات التى تم جمعها ميدانيًا باستخدام برنامج X Xara والذي يسمح برسم طبقات متعددة، مما يجعلها مفيدة للقياس، وصياغة التغييرات، والنظر في الجوانب المختلفة لكل الخريطة. تم إنشاء طبقات منفصلة لكل من السمات الرئيسية، مثل الجدران، خط البروز driplines، والكتل المنهارة وغيرها. ثم تم تحويل الخرائط النهائية لصور JPEG، على أن تؤخذ القياسات بواسطة برنامج Image J حيث يتيح إجراء القياسات الرياضية على الصورة مثل استخراج المساحة والمحيط والطول والعرض وغيرها لكل حفرة تافونى.

كما اعتمدت الدراسة على نموذج الارتفاع الرقمى DEM لمنطقة الدراسة وتم استخدام برنامج Global Mapper وبرنامج ArcGIS لانتاج الخرائط والأشكال المختلفة.

الدراسات السابقة:

لم تتوفر دراسة عربية مستقلة تتناول بالتفصيل ظاهرة حفر التافوني؛ لذا تم الرجوع لبعض الدراسات الأجنبية التي تناولت الظاهرة موضوع الدراسة الحالية بشكل عام كما يلي:

دراسة Turkington,(1998) عن التجوية الكهفية في الحجر الرملي: وتطرقت تلك الدراسة إلى تعريف حفر التافونى بعدة أشكال، والتداخل بينها وبين المصطلحات الأخرى، مثل أقراص العسل Honey Comp والتجويفات (الحويصلات) alveoli، والتي تنتج عن عمليات التجوية المختلفة، وأشارت الدراسة إلى كل هذه المصطلحات على أنها تمثل حفر التافوني، ولكن هذا يجعل من الصعب جدًا على الباحثين معرفة الاختلافات الدقيقة بين هذه الملامح. كما أشار إلى أن كلمة حفر التافوني تُمثل أي شكل لفتحة أو حفرة مجواه فى وجه الصخر أو الكتل الصخرية، ويبرز الحائط الجانبي من حفر التافوني، ويحدث البروز على السطوح الرأسية أو القريبة من الرأسية، بينما المستوى الأرضي يُحدث حفر التافوني، المعروف بالتافوني الأساسي.

وصف (Neuendorf et al., 2005, p. 20) في المعجم الجيولوجي أقراص العسل بإنها خلية محفورة فى الصخر أو التربة، بينما التجويفات تشبه قرص العسل alveoli تُعرّف على أنها فراغ أو تكهف.

ميزَ McBride and Picard (2004) في دراسة عن أقراص العسل في ساحل توسكان بإيطاليا عن حفر التافونى عن طريق الدراسة الميدانية حيث وجد إن حفر التافونى يمكن حدوثها بصورة منفردة، بينما يجب أن توجد أقراص العسل فى شكل مجموعات.

يُعرف (Emabi,N.,2004) في كتابه عن جيومورفولوجية مصر: وادي النيل والصحراء الغربية حفر التافونى على إنها فتحات يتراوح قطرها بين ديسمتر إلى عدة أمتار، إلا إنها ضحلة نسبيًا؛ لأن عمقها لا يتعدى عدة ديسمترات.

وضع كامبل (Campbell, 1999) في دراسته عن التجوية الكيميائية وحفر التافوني المرتبطة بها في ولايد أريزونا التعريف الأكثر شمولية لحفر التافونى، وهي عبارة عن فتحات أو كهوف صغيرة فى الصخر تشكلت بفعل بعض أنواع التجوية. حيث تم ربط التعريف بمعاملات كثيرة مثل الحجم، والشكل، ونوع الصخر، وبعض عناصر المناخ.

يصف كل من (McBride and Picard, 2000) في دراستهما عن أصل وتطور حفر التافوني في رواسب الطوفا بولاية يوتا الأمريكية حفر التافونى على إنها فتحات مترية المقياس يتدلى منها بروزات وأسقف معلقة.

وصف Mellor et al. (1997) في دراستهم عن حفر التافوني في إسبانيا حفر التافوني على إنها فتحات كبيرة الحجم، حيث يبلغ حجمها عدة أمتار مكعبة.

ذكر Athena, M., Owen (2012) في دراسته عن كهوف التافوني في جزر البهاما أنها يُمكن نشأتها وتطورها في الصخور الجيرية بالإضافة إلى نشأتها في الصخور النارية. كما رسم خرائط لكهوف التافوني كبيرة الحجم.

محتوى الدراسة:

وسيتم تناول دراسة حفر التافوني من خلال النقاط التالية:

- التركيب والبنية الجيولوجية لمنطقة الدراسة.
- توزيع حفر التافوني وكثافتها.
- عوامل نشأة حفر التافوني.
- الخصائص المورفومترية لحفر التافوني.
- تصنيف (أنواع) حفر التافوني.
- تطور حفر التافوني.
- الاستنتاجات والخاتمة

- التركيب والبنية الجيولوجية لمنطقة الدراسة:

تفيد دراسة التكوينات الصخرية السطحية فى ظهور حفر التافوني، حيث أن أحجام حفر التافوني تعتمد على طبيعة التكوينات الجيولوجية المنكشفة وما ينتابها من عمليات تجوية وتعرية. وينبغى أن يوضع فى الاعتبار التكوينات الجيولوجية فى ضوء اتجاه الرياح السائدة شرق المنيا. يتضح من الخريطة الجيولوجية شكل (٤) أن التكوينات الجيولوجية السطحية بمنطقة الدراسة تتألف من الصخور الجيرية والرواسب المفككة، التى يتراوح عمرها بين الزمنين الثالث والرابع، على النحو التالي:

١ - تكوينات الزمن الثالث (الإيوسين الأوسط):

يتمثل فى تكوين سمالوط الذي تتألف صخوره من حجر جيري ترسب فى بيئة بحر ضحل مع نيموليت الصلصالى المتداخل مع الطفل والرمل الطفلى، ويشغل هذا التكوين السواد الأعظم من مساحة منطقة الدراسة. ويتراوح سمكه بين ٥ - ٥٠ متر.

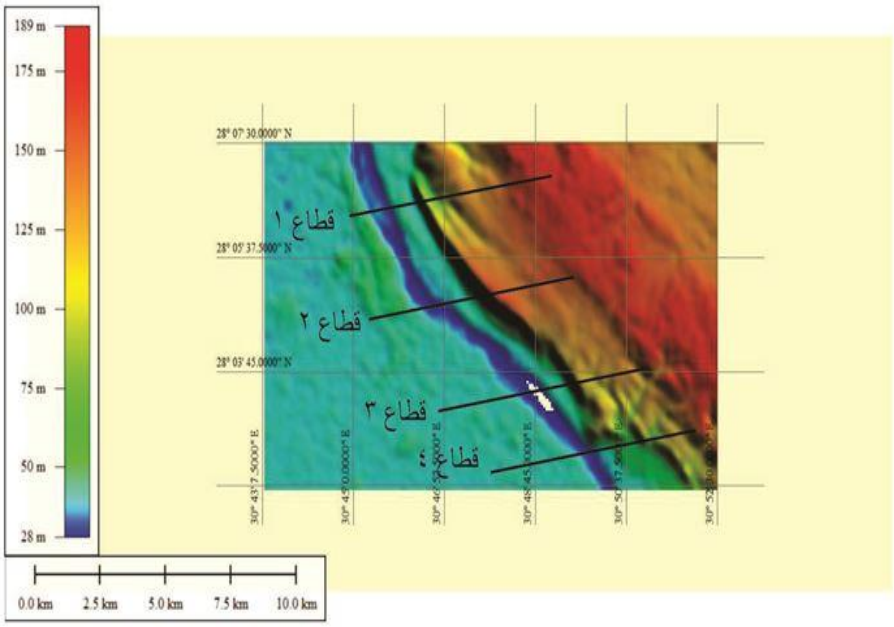
٢ - تكوينات الزمن الرابع (البليستوسين والهولوسين):

تتألف من رواسب الأودية، والحصى، ورواسب السبخات وغيرها. وتتكون حافة وادي النيل الشرقية من الحجر الجيرى الذي تعرض إلى عمليات تحلل وإزاله

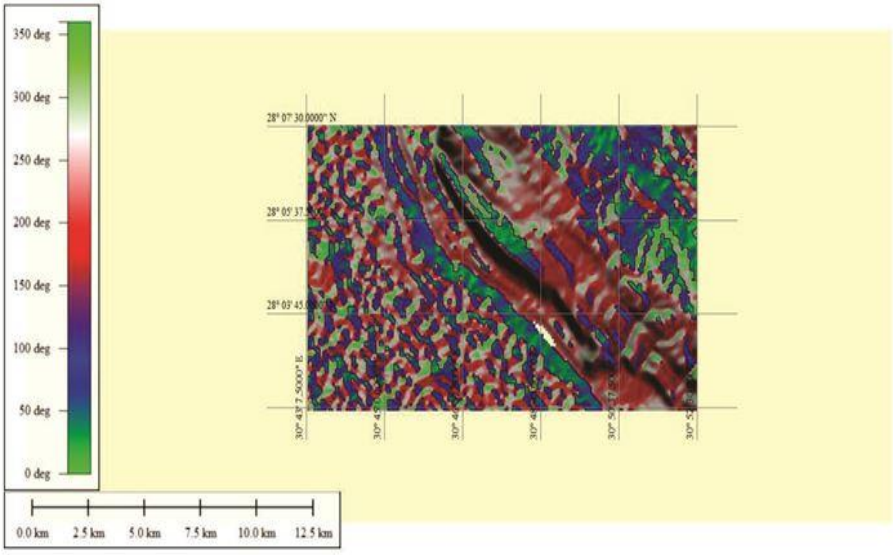
أثناء العصور المطيرة التي شهدتها مصر في الماضي مما أدى إلى تكون الكهوف والجروف وكثرة الفوالق وإلانكسارات بها، والتي تجعلها غير مستقرة وضعيفة جيولوجيًا.

تتألف بنية السفوح بمنطقة الدراسة من تعاقب صخور الحجر الجيرى الصلبة التي ترتكز فوق صخور الطفلة اللينة، كما تتميز صخور الحجر الجيري بكثرة الشقوق والفواصل، كما أن كثير من السفوح تتميز بالحوائط العالية والمنحدرات الشديدة كما يتضح ذلك في الشكلين (٢ ، ٣) مما يزيد من نشاط وقدرة الرياح المحملة بالرمال على النحت فى واجهات السفوح الأمر الذي يساعد على تشكيل حفر التافوني بمنطقة الدراسة.

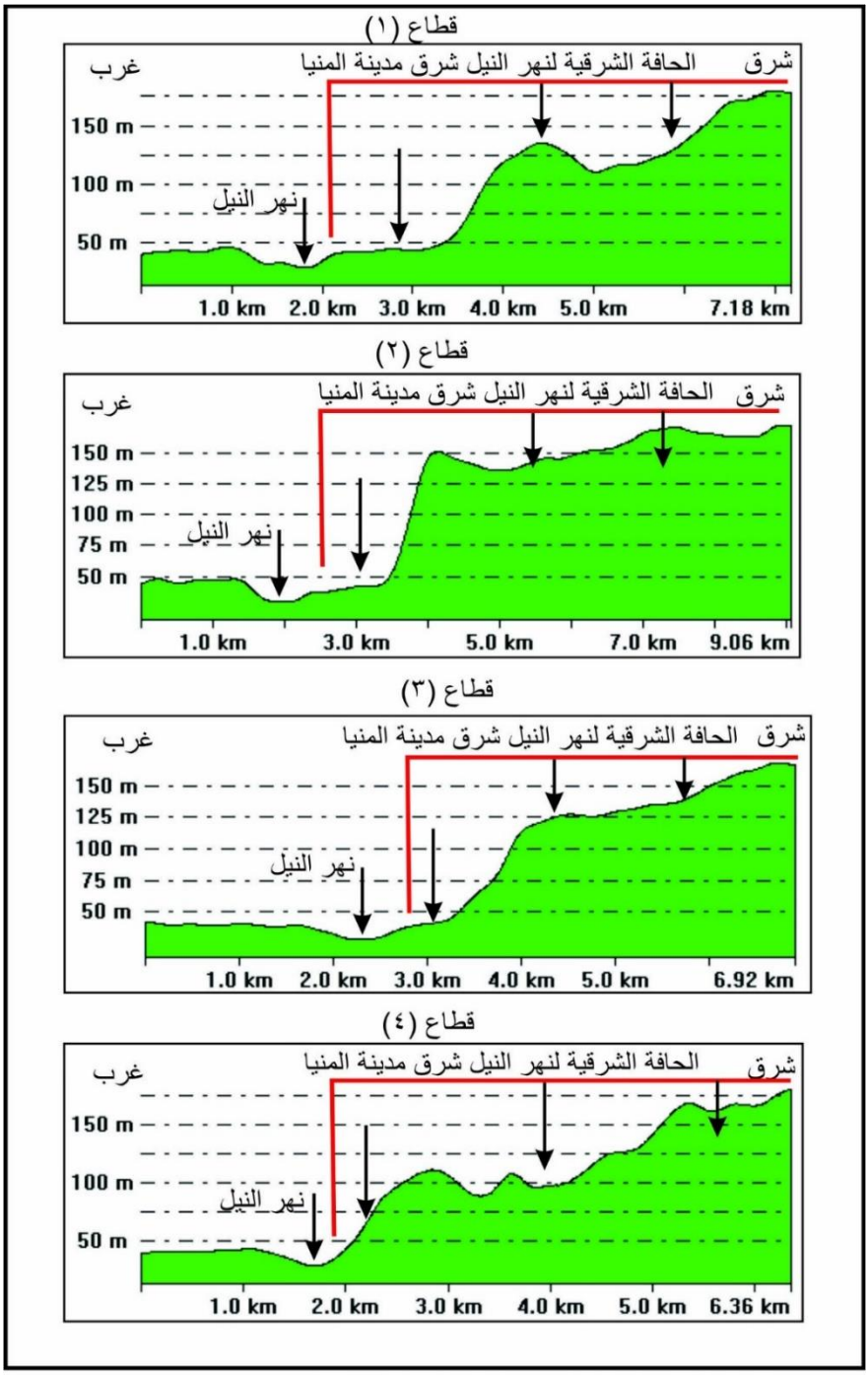
تنتشر حفر التافوني على الحافة الشرقية لنهر النيل شرق مدينة المنيا حيث تحدث عمومًا بشكل أكبر فى مناطق تركيب صخور الأساس أو فى تراكيب الصخور الشاذة. كما تشير الدراسة الحالية أيضًا أن حفر التافوني تنمو نتيجة لوجود الشقوق والفواصل فى الصخر. حيث تتشكل حفر التافوني فى مواضع الشقوق والفواصل الرأسية والأفقية المنتشرة على الحافة الجيرية شرق النيل. حيث تُشكل الفواصل المواقع التى يمكن أن يبدأ عندها تطور حفر التافوني، كما تحد الفواصل من نمو حفر التافوني التي بدأت فى أي مكان أخر على وجه الصخر. أنماط الطبقات، والطوبوغرافيا، خاصة الانحدار وميل الطبقات، بالإضافة إلى وجود مناطق التسرب لها الفضل كمواقع نقاط لنشأة حفر التافوني (Mellor, 1997).



شكل (٢ أ) يوضح الارتفاعات ومواقع القطاعات التضاريسية بمنطقة الدراسة

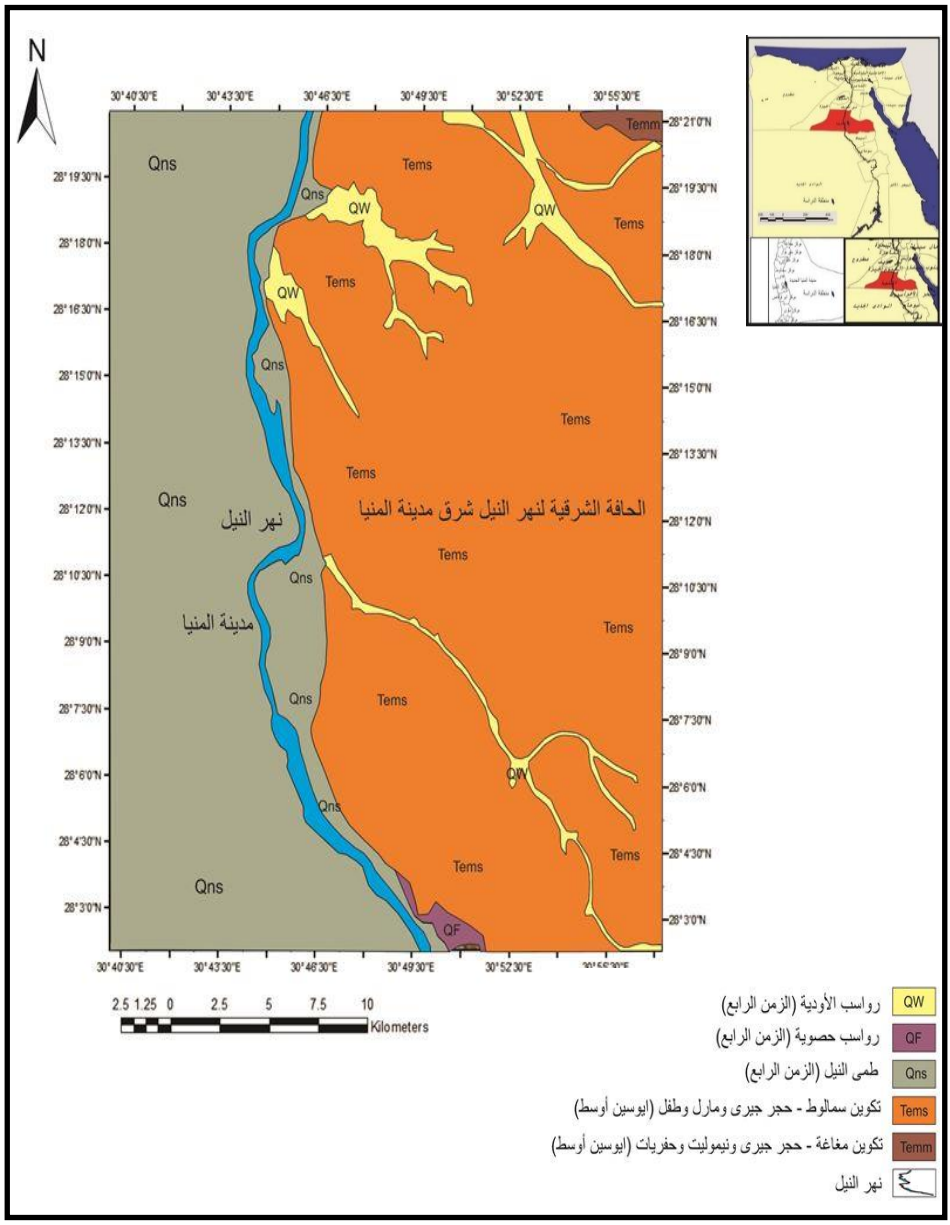


شكل (٢ ب) يوضح الانحدارات بمنطقة الدراسة



الشكل من إعداد الباحث اعتماداً على برنامج جلوبال مابر ١١ ونموذج الارتفاع الرقمى لمنطقة الدراسة

شكل (٣) القطاعات العرضية للحافة الشرقية لنهر النيل شرق مدينة المنيا



الخريطة من إعداد الباحث باستخدام برنامج Arc Map 9.3 اعتمادًا على خريطة مصر الجيولوجية (لوحة بنى سويف) مقياس ١: ٥٠٠٠٠٠

شكل (٤) جيولوجية الحافة الشرقية لنهر النيل (منطقة الدراسة) شرق مدينة المينا

- توزيع حفر التافوني في المنطقة وكثافتها:

تنتشر حفر التافوني بمنطقة الدراسة، وتم رصد تلك الظاهرة في موقعين هما: الحافة الشرقية لنهر النيل شرق مدينة المنيا، والتي تتميز بزيادة تركز وكثافة حفر التافوني بها، ومنطقة محاجر المنيا التي تقل بها كثافة حفر التافوني. وتُشير الملاحظات الميدانية لمنطقة الدراسة إلى أن حفر التافونى تتشكل جيدًا في المناطق ذات النفاذية العالية على طول المفاصل والكسور، والأسطح الطبقية، وكذلك حول الحافات فى مواقع التحجير، ومع ذلك، تظهر حفر التافوني موزعة عادة بشكل عشوائي وكثيرة في المناطق التي لا يوجد بها تباين واضح في المسامية أو النفاذية. صورة (٢).

تم العثور على نوعين رئيسيين من حفر التافوني المحتملة في الحافة الشرقية لنهر النيل شرق مدينة المنيا، وهو نوع كبير الحجم ونوع صغير الحجم. وحفر التافوني كبيرة الحجم موجودة طبيعيًا على طول الحافة الجيرية. وحفر التافوني الصغيرة المحتملة تحدث بشكل رئيسي في ملامح ثقافية مثل حُفر الطرق، والمحاجر، والمباني. ومن هذه النقطة فصاعدًا داخل إطار هذه الدراسة سوف يُشار إلى هذه الملامح على أنها حفر التافوني. وبالنسبة للتمثيل العام لتوزيع كهوف التافوني على الحافة الشرقية لنهر النيل فقد تم اختيار جميع المواقع لأنها منحدرة، ويسهل الوصول إليها لوجستيًا، وتحتوي على ملامح حفر التافوني. وقد تم اختيار

كل من الخصائص الثقافية بسبب معرفة تاريخ الجروف الاصطناعي. (الصور من ٨-١١).

- آليات وعوامل نشأة حفر التافوني:

تتشكل حفر التافوني نتيجة التجوية التكهفية أو تجوية أقراص العسل (Hacker,2003). وتحدث التجوية التكهفية نتيجة لعمليات التجوية الكيميائية والميكانيكية على أوجه الجروف، كنتيجة لإزالة الحصى مما يؤدي إلى تكون الحفر والتجويفات الكبيرة. أما تجوية أقراص العسل فتنتج عن عمليات التجوية الكيميائية التي تؤدي إلى تنقير الصخر وظهور العديد من الحفر الدقيقة على سطح الصخر (Mustoe, G. E., 1982). وبالنسبة لآلية التشكيل الفعلية لحفر التافوني فمختلف عليها، ولكن اقترح (Huinink, 2004) بعض الطرق لتطور حفر التافوني مثل: نقل الاملاح salt transport، والتجوية الملحية salt weathering، وحالة التصلب case hardening، ومرونة القلب الصخرى core softening، والترقق والتقشر flaking and scaling، وزيادة دوران الهواء increased air circulation .

ويركز البحث الحالي على الطرق المقترحة لتشكيل حفر التافوني، ومعدل تطورها، والأسباب التي ساعدت على حدوثها فى مواقعها الحالية وفيما يلي عرض لبعض آليات وعوامل تشكيل حفر التافوني.

١- تطور معادن المتبخرات evaporite minerals، خاصة الملح الصخرى halite:

تُمثل الآلية الأكثر تدعيمًا فى تطور حفر التافوني. ويُعتقد أن هذه العملية تحدث عندما يحدث التبخير ويصعد الماء المالح بواسطة الخاصة الشعرية خلال الصخر، حينئذ يتبخر الماء من سطح الصخر، مما يؤدي إلى تبلور الأملاح. حيث يصل الماء إلى أعمق منطقة من حفر التافوني أولًا، الأمر الذي يؤدى إلى حدوث بلورة معظم الأملاح فى هذه المنطقة الداخلية. ويؤدي هذا إلى تجوية ظهر الكهف بشكل أسرع، وإعطاؤه الشكل المقعر. ويزداد تأثير التجوية نتيجة لارتفاع محتوى الرطوبة. وتُسبب المعادن الموجودة فى الصخر الانتفاخ. وقد دعم (Hacker, 2003) هذه الطريقة لتطور حفر التافوني، حيث يزداد تركيز الملح فى الحوائط والفتحات الداخلية داخل حفر التافونى بشكل أكبر من السقف والصخور المحيطة بها.

وتتطور حفر التافونى على الحافة الشرقية لنهر النيل شرق مدينة المنيا بسبب الملح الصخرى halite أيضًا باعتبارها واقعة فى منطقة صحراوية جافة، حيث تُحرك الرياح الأملاح، وتتبلور الأملاح فى كهوف التافونى بعد نقلها. ويدعم هذا الرأي كل من McBride و Picard أثناء دراستهم لحفر التافونى الصحراوية

فى الأقاليم الجافة، ووجدا أن أي حفرة تافوني لم تتطور أكثر من ١٠ كيلومتر من مصدر الملح فى البلايا McBride and Picard's (2000).

٢- الترقق والتقشر Flaking and Scaling:

هى آلية تشكيل أخرى مقترحة لتدعيم تشكيل حفر التافوني، ويحدث الترقق والتقشر عن طريق تبلور الأملاح. ويعرف الترقق Flaking على إنها عملية تجوية الصخور المتوازية على سطح الصخر، مما يؤدي إلى تكون رقائق يتراوح سمكها بين ١ ملم إلى ١٠ مليمتر، بينما التقشر Scaling تؤدي إلى تكون قطع يتراوح سمكها بين ١سم إلى ١٠ سنتيمتر(Rogner, 1988). حيث يؤدى تبخر الرطوبة الموجودة فى الصخر المحتوي على كميات كبيرة من الأملاح إلى تكون طبقات الملح التي تُسبب الضغط الناشئ على الصخر، وتُهيئ الصخر لحدوث التقشر والترقق. وتتميز حفر التافوني المتطورة بشكل جيد بزيادة معدل التقشير والترقق على أسطحها بشكل أكبر من حفر التافوني الأقل تطورًا. ويعتمد معدل التقشير والترقق على نسبة الرطوبة والمطر الحالي.

٣- حالة التصلب Case Hardening أو الكربنة (التلاحم بالسيلكا) Cementation :

وتقوم هذه الآلية على أساس أن الجزء الخارجي من الصخر يكون فى الغالب أصلب من الجزء الداخلي للصخر، وقد يرجع ذلك إلى الاختلاف فى التركيب، أو بسبب الاختلافات فى الضغط ودرجة الحرارة بين الغلاف الجوي الخارجى والصخور الداخلية (Mottershead and Pye, 1994). ويمكن الاختلافات في الظروف البيئية بين الصخور الداخلية والصخور الخارجية تُسبب صعود المحاليل الغنية بالمعادن إلى الخارج حيث يكون المحلول محملًا بمواد الكربنة أو التلاحم مثل أكسيد السيليكا، وأكسيد المغنيسيوم، وأكسيد الحديد، ويترسب الكالسيت على سطح الصخرة، والتي قد تُسبب حالة تصلب السطح الخارجي Case Hardening، وأثار التجوية تكون حينئذ محدودة مؤقتًا (Matsukura, y. and Tanaka, Y., 2000). حيث يؤدي التصلب إلى زيادة مقاومة الصخر لعمليات التجوية. فإذا ما دُمرت القشرة الخارجية للصخر بطريقة ما، حينئذ ينكشف الجزء الداخلي من الصخر ويصبح عُرضه للهواء والرطوبة، الأمر الذي قد يؤدي إلى تشكيل حفر التافوني بسبب اختراق هذه الطبقة الخارجية الصلبة. هناك العديد من الحالات التي يحدث فيها تطور حفر التافوني فى المناطق التى يحدث فيها حالات التصلب الصخرى، على أيه حال، هناك حالات يحدث فيها تطور حفر التافوني بدون حدوث حالات التصلب الصخري (Huinink et al., 2004) .

٤- مرونة القلب الصخرى Core Softening:

تُبنى هذه الآلية على أساس اختلافات درجة مقاومة الصخور أيضًا، وتحدث تقريبًا بنفس طريقة حالة التصلب الصخرى. ويُعتقد أن قلب الصخر يكون مرن عن طريق تسرب المعادن إلى خارج القلب الصخري، بسبب محتوى الرطوبة. حيث يلين قلب الصخر ثم يتم تدمير القشرة الخارجية للصخر مرة أخرى لأى سبب ما وينكشف القلب الصخري ويحدث تطور حفر التافوني عند هذه النقطة ويحدث ذلك لبعض مواقع حفر التافوني وليس فى كلها (Huinink et al., 2004).

يوضح (2003) Hacker أن تطور حفر التافوني يمكن أن يكون مرتبط بتغيرات مناخية دقيقة. وبالنظر إلى توزيع حفر التافوني بمنطقة الدراسة، وُجدَ أن هناك نقص ملحوظ فى حدوث حفر التافوني فى المناطق التي لم تتعرض بشكل مباشر إلى ضوء الشمس. وقد تم تسجيل نقطة الندى داخل وخارج كهوف التافوني، وتبين أن نقطة الندى بداخل كهوف التافونى أعلى بمتوسط ١,٢ درجة مئوية تقريبًا بالمقارنة بخارج الكهوف.

٥- الاختلافات المناخية والصخرية:

تعتمد عناصر التحكم في معدلات بدء تكون حفر التافوني وتطورها على التغيرات المناخية والصخرية. فتتمثل العوامل المناخية فى تكرار حدوث البلل، وطول فترة الجفاف، ودرجة الحرارة، والرطوبة داخل التجويف أما العوامل الصخرية مثل

المسامية والنفاذية. وقد وجد الباحثون في المناطق الساحلية باليابان أن بداية تنقير حُفر التافوني تبدأ فقط بعد مرور الزمن والذي يُعرف بالفارق الزمنى lag time. فبمجرد إنشاء حفرة انتقائية تزداد حينئذ حفر التافوني في العمق بمعدل نمو غير ثابت. ومع مرور الوقت، يقل معدل تعميق حفر التافوني بشكل كبير Sunamura (1996) .

بالنسبة للاختلافات المناخية:

تتميز معدلات توسيع وتطور حفر التافوني في المناخ الجاف بإنها أبطأ من تشكيل حفر التافوني في البيئات الرطبة بمعدل أبطأ يتراوح من ٢-٤ من الحجم، كما تتميز بإطالة أمدها الذي يتراوح من عدة آلاف إلى ملايين السنين (Norwick & Dexter, 2002)؛ وربما يرجع ذلك بسبب تقلبات الحرارة الكبيرة والفترات الطويلة نسبيًا بين دورات البلل. وقد يؤدي التطور التدريجي البطيء إلى تغير واضح في أحجام الكهوف الكبيرة النموذجية من حفر التافوني في المناخات الأكثر جفافًا.

وجدَ Huinink, Pel, and Kopinga (2004) أن معدل نمو حفر التافوني يكون أسرع عندما تكون فترة التجفيف طويلة ومعدلات التبخر بطيئة. ويؤدي تكرار البلل مع الإذابة الملحية وطول فترة التجفيف بين البلل دورًا كبيرًا في التأثير على معدلات التغيير في حفر التافوني.

وقد لاحظ الباحث من خلال الدراسة الميدانية لمواقع حفر التافونى بمنطقة الدراسة أن الأجزاء الداخلية من حفر التافوني تكون أكثر برودة لأنها محمية من الشمس. وعندما يدخل الهواء الرطب التجويف البارد يتكثف على أكثر جزء مظلل من التجويف الداخلي، والسقف الداخلي، والحائط الخلفي، وقد يكون المناخ السبب في عمليات التجوية التفاضلية بشكل تفضيلي في اتجاه تصاعدي وإلى الوراء.

قد يختلف المناخ داخل حفر التافوني الكبيرة عن الحفر الصغيرة لأن حفر التافوني الكبيرة ضخمة بما يكفي لخلق مناخ محلي مع ظروف جوية رطبة بما فيه الكفاية لحدوث تغير مناخي في الداخل. ويتمثل المناخ المحلي داخل حفر التافوني الكبيرة في درجة الحرارة، ونسبة الرطوبة في الهواء في فترة معينة على مدار ٢٤ ساعة. حيث يختلف هذا المناخ المحلي في الحفر الكبيرة بشكل أكبر عن حفر التافوني الصغيرة التي قد لا تكون قادرة على دعم درجة الحرارة والرطوبة بشكل أكثر ثباتًا. وقد لوحظ ميدانيًا أن قصر فترة التجفيف في المواضع الرطبة قد تتجاوز حفر التافوني الصغيرة بسرعة، وتمنعها من التطور إلى حفر التافوني الكبيرة، من مقياس ديسيمتر إلى متر.

تم إجراء مقارنة بالنسبة لدرجة الحرارة خارج وداخل حفر التافوني بمنطقة الدراسة، ووُجدَ اختلاف بسيط فى درجة الحرارة داخل وخارج كهوف التافوني، بمتوسط قدره ٠,١ درجة مئوية؛ لذا فإن المناخ يُمكن أن يكون له تأثيرًا محدودًا على معدل الترقق والتقشر.

بالنسبة للاختلافات الصخرية:

قد تُستخدم أيضًا لحساب التغير فى معدلات تغير حفر التافوني. حيث لاحظ الباحث حفر التافوني موزعة على نطاق واسع وتنمو سريعًا على امتداد الحافة الشرقية لنهر النيل شرق مدينة المنيا التي تتكون من الحجر الجيرى. وبالنسبة لتشكيل حفر التافوني يجب أن تكون الصخور ذات قوة كافية لدعم الفراغ أو التجويف. ويدعم هذا التفسير من خلال الملاحظات الميدانية بمنطقة الدراسة، حيث انهيار الفراغات يمثل الدليل، ومنع تطور حفر التافوني الكبيرة على طول هذه الجروف. ويبدو أيضًا أن الصخور تحتاج إلى أن تكون على مسافة معينة بعيدًا عن رذاذ نهر النيل من أجل حدوث تطور حفر التافوني أو استمرار تطورها. والغالبية العظمى من حفر التافوني فى هذه الدراسة تحدث على طول الحافة الشرقية لنهر النيل شرق مدينة المنيا.

٦- حركة دوران الرياح:

يري الباحث أن حركة دوران الرياح يُمكن أن تُعزز من تطور كهوف حفر التافوني بمنطقة الدراسة حيث تقع الحافة الشرقية لنهر النيل شرق مدينة المنيا فى مهب اتجاه الرياح السائدة وهي الرياح الشمالية الغربية – الجنوبية الشرقية. وزيادة حركة دوران الرياح داخل حفر التافوني سيُعزز من ارتفاع معدلات التجفيف، وبالتالي زيادة معدل تبلور الأملاح داخل كهوف التافوني. وبذلك يمكن للرياح أن

تؤدي دورًا كعاملًا في تشكيل حفر التافوني الصغيرة، ولكن غير مُحتمل أن تؤدي نفس الدور بالنسبة للحفر الكبيرة.

٧- العوامل الجغرافية الثانوية:

وتشمل الصخور الناتئة أو أوجه جروف المنحدارات، والاتجاه، والارتفاع فوق مستوى سطح البحر، وتوافر واتجاه تدفق المياه الجوفية، ونشاط الحيوانات الصغيرة (مثل الزواحف والقوارض)، والإنسان، والقرب من أحجام كبيرة من المياه مثل نهر النيل، وتوالي دورات الذوبان والتجميد.

وجدَ Mottershead (1994) أن الارتفاع فوق مستوى سطح البحر، والمسافة من متوسط علامة ارتفاع المياه، واتجاه الصخور بالنسبة لاتجاه الرياح السائدة هي العوامل المهمة فى تطور حفر التافوني. كما وجد أن شكل انحدارات جروف المنحدارات من العوامل المهمة أيضًا على توضيح عما إذا كانت حفر التافوني سوف تتطور أم لا.

ويستنتج الباحث بروز العلاقة المكانية الإيجابية القائمة بين ارتفاع الحافة الشرقية وقربها من نهر النيل، ووجود حفر التافوني. ومن ناحية أخرى، وُجدَ أن اتجاه الرياح السائدة تُعد عاملًا مهمًا في تشكيل حفر التافوني بمنطقة الدراسة.

ومما سبق يُمكن القول بأن تشكيل حفر التافوني لا يعتمد على آلية تجوية واحدة، بل التقاء العمليات والعوامل الجغرافية والبيئية في عمل متوافق ومتناغم.

- الخصائص المورفومترية لحفر التافوني:

تم قياس حفر التافوني صغيرة الحجم في موقعين الأول، على الحافة الشرقية لنهر النيل، والثاني في محجر المنيا وحفر الطريق الشكل (٥). وهو محجر الحجر الجيري الواقع إلى الشمال من الحافة الشرقية لنهر النيل باتجاهه محافظة بنى سويف، والمحجر عمره حوالي ٣٥ سنة. وأجريت القياسات في هذه المواقع من قبل الباحث، وشملت القياسات أقصى ارتفاع داخل وخارج الكهوف، والعمق، وأقصى عرض داخل وخارج الكهوف.

وتم إجراء التحليل الاحصائي من القياسات المأخوذة ميدانيًا من كل حفر التافوني نفسها وتلك التي قيست من خرائط الكهوف، وحُسبت النسب وأُجريت التحليلات الإحصائية لمقارنة حفر التافوني بعضها البعض فى شرق مدينة المنيا، وكذلك مقارنة حفر التافوني الصغيرة المأخوذة من حفر الطرق والمحاجر، وحفر التافوني نفسها.

وقد تم إجراء اختبارات F على كل مجموعة البيانات لإظهار قدر من التباين، وتستخدم هذه المعلومات لتحديد أفضل اختبار T لاستخدامها مع مجموعة البيانات. واستخدمت اختبارات Two tailed T tests لاجراء المقارنة، وتم إجراء الاختبارات لمجموعات البيانات عالية التنوع، نظرًا للاختلافات الكبيرة فى الوقت الحاضر.

كانت الفرضيات تختبر ما يلي: ١- حفر التافوني لا تختلف مورفومتريًا عن بعضها البعض في أي من النسب المعروضة. ٢- حفر التافوني الصغيرة لا تختلف مورفومتريًا عن حفر التافونى الكبيرة في أي من النسب المعروضة. وجرى اختبار كل الفرضيات عند مستوى ثقة ٩٥%. وتوضح مقارنات الأشكال البيانية أيضًا مقارنة النسب والقياسات المختلفة لكل من حفر التافونى الصغيرة والكبيرة، واختبار الاختلافات الشكلية كتطور لحفر التافوني.

الحجم:

وقد تم احتساب الحجم أيضًا لبعض حفر التافوني الكبيرة، والتي يمكن أن يفترض أن تكون نصف القطع الناقص، حيث تم حساب المعادلة بالنسبة للحجم باستخدام حجم القطع الناقص ABC 4/3л =V ، حيث تمثل A,B,C الطول والعرض والارتفاع. نتائج هذه المعادلة كانت منقسمة فى النصف، إلى الحجم التقريبي. ثم تم حساب معدلات التآكل فى السنة لكل من حفر التافوني الكبيرة والصغيرة ومن ثم مقارنتها.

$$V_{cave}=\frac{1}{960}\pi d\left(\alpha d^4\alpha'-5W_I\alpha' d^2-5W_E\alpha' d^2-5\alpha H_I d^2-5\alpha d^2 H_E+40W_I H_I+20W_I H_E\right.$$

$$\left.+20W_E H_I+40W_E H_E\right)-\frac{1}{12}\frac{(d+2\delta)\left(d^2-2d\delta-2\delta^2\right)\sqrt{\frac{W_I^2\delta^2(d+\delta)^2H_I^2}{d^4}}}{\delta(d+\delta)}$$

المتغيرات من المعادلة:

حجم حفر التافونى= V

= αالجزء المكتفئ من حفر التافونى هذه

= WIالعرض الداخلى

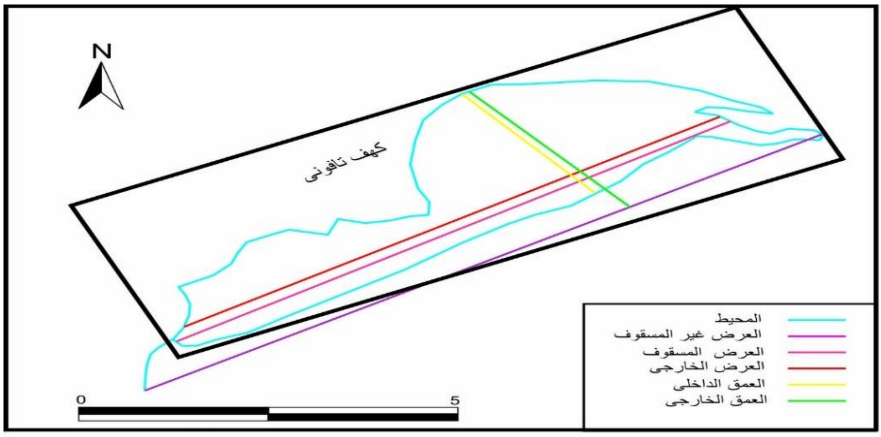
= WEالعرض الخارجى

= HIالارتفاع الخارجى

= HEالارتفاع الخارجى

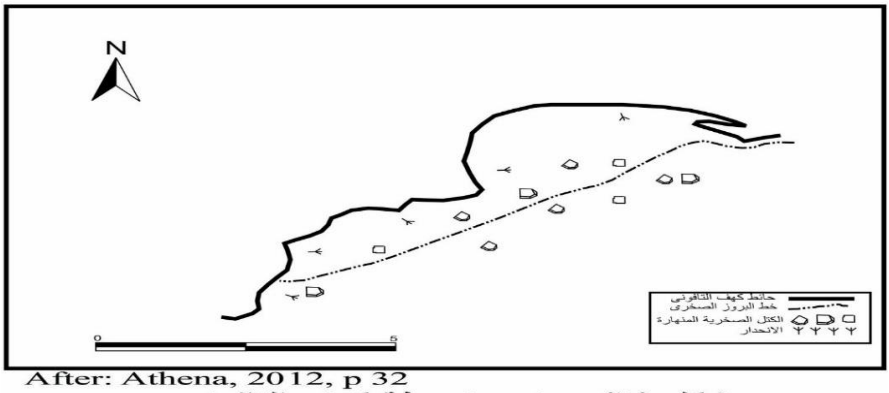
= δ أصغر رقم سالب (٠,٠٠٠١ -)

نتائج التحليل الإحصائي



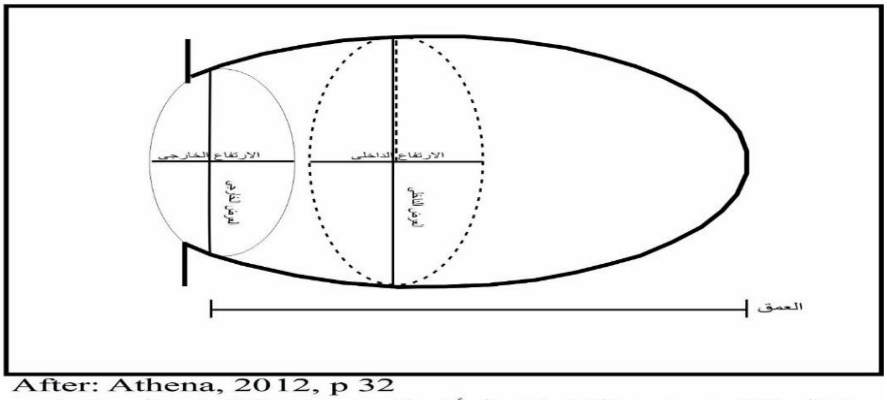
After: Athena, 2012, p 32

شكل (٥) يوضح القياسات المأخوذة من خرائط كهوف التافونى
المساحة كانت مأخوذة من المساحة المتضمنة فى المحيط



After: Athena, 2012, p 32

شكل (٦) يوضح خريطة كهف التافونى



After: Athena, 2012, p 32

شكل (٧) يوضح القياسات المأخوذة من حفر التافونى الصغيرة

حفر التافوني الصغيرة

تم قياس ٢٠٠ حفرة تافوني منفردة في الحافة الشرقية لنهر النيل شرق مدينة المنيا، ومن منطقة محاجر المنيا، وتم مقارنتها مع بعضها البعض باستخدام نفس الاختبارات الإحصائية ملحق (١) وأُخذت العينات من مناسيب مختلفة من الحافة بعضها من قواعد الحافة والأخر على مناسيب مرتفعة من الحافة وذلك لأن حفر التافوني تنتشر على مناسيب مختلفة فى وجه الحافة حتى تكون العينة ممثلة لمعظم حفر التافوني المنتشرة بالحافة.

تم مقارنة أوجه الجروف من خلال النسب التالية، العرض الداخلي (IW) على عرض المدخل (EW)، وارتفاع المدخل (EH) على الارتفاع الداخلي (IH)، وارتفاع المدخل (EH) على عرض المدخل (EW)، والارتفاع الداخلي (IH) على العرض الداخلي (IW)، ونسبة EH/IH على العمق (D)، وتبلغ نسبة IH/IW على العمق (D)، وEH/EW على العمق (D)، ونسبة EW/IW على العمق (D). وتم اختبار فرضيات العدم أو الفرض الصفري لكل أوجه الجروف حيث تفترض أن كل النسب بالنسبة لأوجه الجروف سوف لا تختلف اختلافًا كبيرًا (أى أن متوسط الفروق بين النسب لكل أوجه الجروف يساوى صفرًا).

تم اختبار الفرض الصفري "لا توجد اختلافات مورفومترية بين حفر التافوني على وجه الجرف عند مستوى ثقة ٩٥% بمحجر المنيا". ويتضح من نتيجة اختبار

ت أنها دالة احصائية حيث إن قيمة "ل" أقل من ٠,٠٥ (p value < 0.05)، لذلك فتم رفض الفرض الصفري أى أنه "توجد اختلافات مورفومترية كبيرة بين نسب أبعاد حفر التافوني المختلفة وذلك بالنسبة لكل المتغيرات".

أما بالنسبة لحفر التافوني المنتشرة على وجه الجرف الصخري المتمثل فى الحافة الشرقية لنهر النيل فقد تم اختبار الفرض الصفري "لا توجد اختلافات مورفومترية بين حفر التافوني على وجه الجرف عند مستوى ثقة ٩٥% بالحافة الشرقية". ويتضح من نتيجة اختبار ت أنها دالة احصائية حيث أن قيمة "ل" أقل من ٠,٠٥ (p value < 0.05) وذلك بالنسبة لعدد ١٠ متغيرات، لذلك فتم رفض الفرض الصفري أى أنه "توجد اختلافات مورفومترية كبيرة بين نسب أبعاد حفر التافوني المختلفة بالنسبة لتلك المتغيرات". فى حين تم قبول الفرض الصفري للمتغير رقم ٥ والمتمثل فى نسبة الارتفاع الداخلي/ العرض الداخلي لأن هذه النسبة لم تكن كبيرة.

يتضح من التحليل الاحصائي الخاص بمعامل الارتباط بين نسب أبعاد حفر التافوني المختلفة على الحافة الشرقية لنهر النيل أنه توجد علاقة طردية قوية بين العرض الخارجي والعرض الداخلي تبلغ ٠,٨٧٦، كما توجد علاقات طردية متوسطة بين العرض الخارجي والارتفاع الخارجى تبلغ ٠,٥٦١. فى حين توجد علاقة عكسية ضعيفة جدًا بين العرض الداخلي والارتفاع الداخلي تبلغ – ٠,٠٣٠. أما بالنسبة لمعامل الارتباط بين نسب أبعاد حفر التافوني فى محجر المنيا فاظهر

التحليل الاحصائي وجود علاقات طردية فقط، حيث توجد أربعة علاقات طردية قوية جدًا بين العرض الخارجي والعرض الداخلي تبلغ ٠,٩٩٩، وعلاقة طردية قوية جدًا بين الارتفاع الخارجي والارتفاع الداخلي تبلغ ٠,٩٧٩، وعلاقة طردية قوية بين الارتفاع الداخلي والعمق تبلغ ٠,٧١٩، وعلاقة طردية قوية بين الارتفاع الخارجي والعمق تبلغ ٠,٦٧١، فى حين توجد علاقة طردية ضعيفة بين العرض الخارجي والعرض الداخلي تبلغ ٠,٢٧١.

حفر التافونى الصغيرة مقابل حفر التافونى الكبيرة:

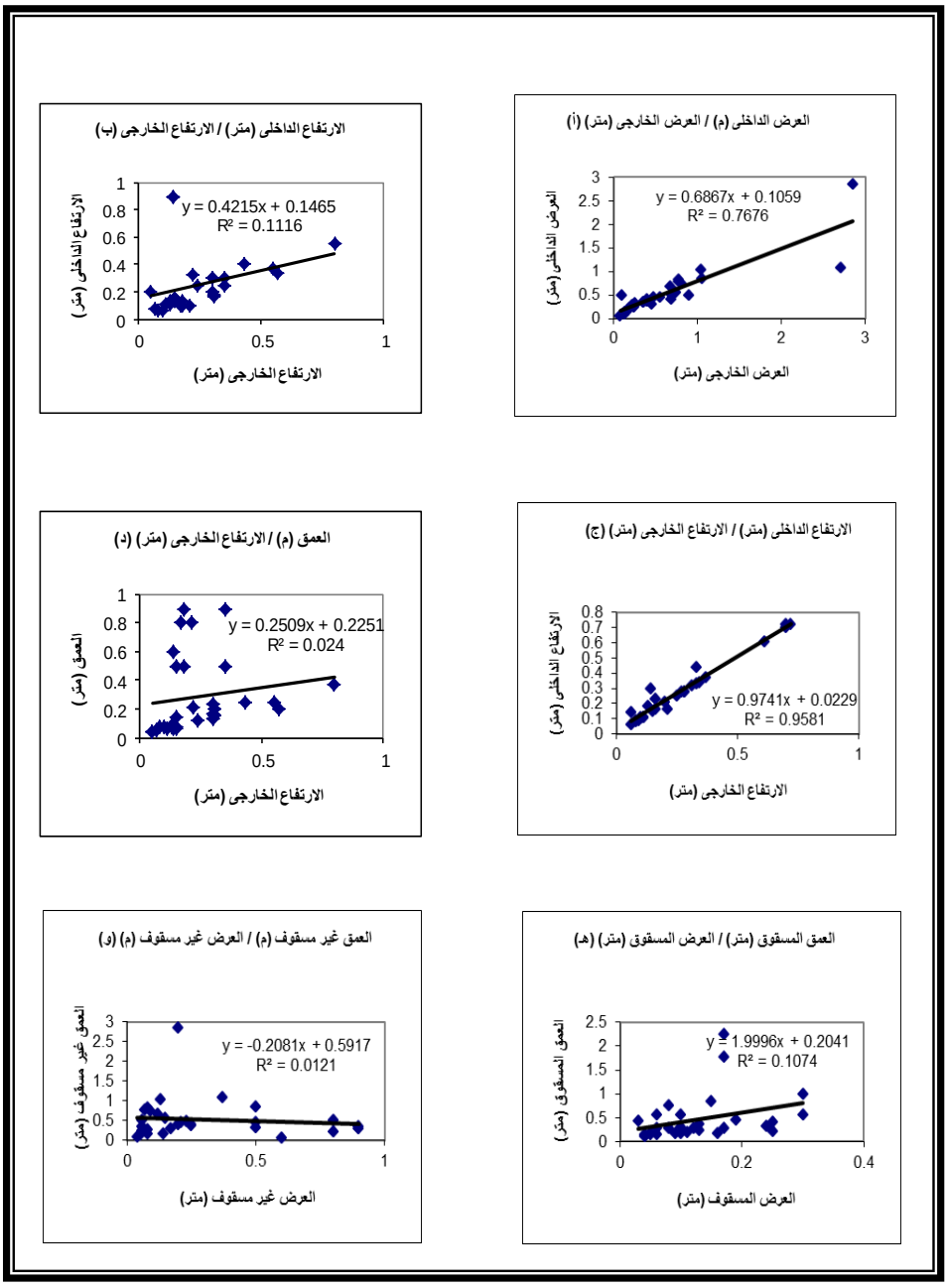
تم تجميع البيانات من محاجر المنيا لتشمل مجموعة البيانات لحفر التافوني الصغيرة. ثم قورنت هذه البيانات إلى مجموعة البيانات الكاملة لحفر التافوني الكبيرة في كل النسب الموجودة فى كل من مجموعات البيانات. أدى هذا إلى نسبتين مختلفتين، EW/ IW، والعمق D علىEW/ IW ، ثم قورنت هذه النسبة إلى كل ما يعادل نسب حفر التافوني المسقوفة (R) والمكشوفة (UR). وتتضح الإحصاءات الوصفية لجميع هذه النسب في الجدول (٧). ويتمثل الفرض الصفري لهذه المقارنات فى أن هذه النسب لن تكون مختلفة كثيرًا ($p\ value < 0.05$). وقد قُبل الفرض الصفري فقط بالنسبة للمقارنة بين نسبة العرض الخارجي على العرض الداخليEW/IW من حفر التافوني المكشوفة على نسبة EW/IW بالنسبة لحفر التافوني الصغيرة. بينما تم رفض الفرض الصفري بالنسبة للمقارنات الثلاثة الأخرى

حيث كانت النسب مختلفة اختلافاً كبيراً حيث قيمة ($p\ value < 0.05$). ملحق (٢).

يوضح شكل (٨ أ) نسبة العرض الداخلي / العرض الخارجي، ويتضح أن غالبية حفر التافوني الصغيرة تكون على مقربة من نفس العرض في كل من العرض الداخلي والعرض الخارجي، بحيث يكون هناك القليل جدًا من شكل البروزات الجانبية lateral projections. نقاط البيانات بالتخطيط فوق سطر واحد إلى واحد هو موضح باللون الأصفر سيكون لها بروزات جانبية.

يوضح شكل (٨ ب) نسبة الارتفاع الداخلي/الارتفاع الخارجي، ويتضح أن غالبية حفر التافوني الصغيرة إما تكون على مقربة من نفس الارتفاع في كل من الارتفاع الداخلي والارتفاع الخارجي أو يكون ارتفاعها الخارجي أكبر من ارتفاعها الداخلي؛ حفر التافوني هذه ليس لديها شُرفات رأسية vertical overhangs. نقاط البيانات بالتخطيط فوق سطر واحد إلى واحد هو موضح باللون الأسود سيكون لها شُرفات رأسية.

يوضح الرسم البياني شكل (٨ ج) نسبة الارتفاع الداخلي/الارتفاع الخارجي لحفر التافوني الكبيرة. حفر التافونى الموجودة على الخط الأسود أو أسفله ليس لديها شُرفات رأسية vertical overhangs. بينما البيانات فوق الخط الأسود توضح وجود شُرفات رأسية بحفر التافوني.



شكل (٨) يوضح العلاقات بين العرض والارتفاع والعمق لحفر التافونى المختلفة

يلاحظ من الصورتين (٣،١) أن حفر التافوني فى الصورة (١) امتلأت بالفعل بقدر من الرواسب ٦ سم إضافية في كلا الموقعين من الحفر الموجودة في حفر التافوني نفسها. بينما يتضح من الصورة (٣) احتواء حفر التافونى الموجودة بين القشرة الصخرية (حفر القشرة) على القليل جدًا من الرواسب. يبدو عادة أن الرواسب تتراكم في الغالب على نفس الجانبين من الحفرة، على طول الجانبين الشمال إلى الشمال الشرقي. وكان هذا واضحًا بشكل خاص في كلا الموقعين للعينة بالنسبة لحفر التافوني الموجودة بالحافة الشرقية لنهر النيل ومحجر المنيا (الشكل ١٢). وحفر التافوني هذه تكون أيضًا الأكثر تعرضًا لخطر نحت الرياح فى عينة حفر التافوني. هذه النتيجة يمكن أن تُظهر تأثير الرياح، واتجاه الرياح فى تطور حفر التافوني.

الحجم:

تم اجراء تجربة لحساب حجم الرواسب التى تم ازاتها من حفر التافوني لحساب معدل التآكل السنوي فى كل من حفر التافوني على الحافة الشرقية لنهر النيل، وحفر التافوني المنتشرة بمحجر المنيا، استنادًا إلى عدد من الملامح المقاسة من كل حفرة. حُسبت تقديرات تقريبية لحجم وجه كل جرف مما أدى إلى وجه الجرف على الحافة الشرقية والتي بها أكبر حجم من حفر التافوني الحالية، ووجه الجرف بمحاجر المنيا والتي تشير إلى أصغر كمية رواسب إزيلت.

تم حساب معدل التآكل لحفر التافوني الكبيرة والصغيرة (٥ حفر تافونى كبيرة وصغيرة)، ويبلغ معدل التآكل السنوي فى حفر التافوني الكبيرة نحو ٤٥ سم مكعب، بينما يبلغ معدل التآكل السنوي فى حفر التافوني الصغيرة نحو ١٧ سم مكعب.

توجد حفر التافوني في ملامح ثقافية عديدة، وتشمل حفر الطرق ووجهات المباني صورة (٢٣). وهناك نوعان من المباني، وكلاهما تاريخية، ويظهر عليها أدلة واضحة على عمليات التجوية. ويبدو أن هذه التجوية تحدث على طول هذه المباني بصورة منخفضة وقريبة من الأرض وذلك بواسطة الرياح المحملة بالحبيبات، وهذه الملامح التي تشبة حفر التافوني.

بالنسبة لحجم حفر التافونى الصغيرة:

لم تسفر المقارنات التي تمت بين حفر التافوني الصغيرة على كثير من النسب المتشابهة، وقد يكون ذلك لأن حفر التافوني الصغيرة تحدث في نمط أكثر عشوائية، أو ربما لأن ملامحها أكثر حساسية للتغيرات الطفيفة في الصخر، مثل حجم الحبوب، وتباعد التلال، والشكل. ورد الفعل هذا فى التغيرات الصخرية قد يؤدي إلى عدم نشأة نمط مشترك حتى تصل حفر التافوني إلى حجم معين. والنسب التي كانت متشابهة إحصائيًا كانت تلك النسب التي استخرجت بعض النسب الأخرى على العمق، وتبين أنه لا يمكن أن تُصنف حفر التافوني الصغيرة فقط في بُعدين، ولكن البُعد الثالث مهم جدًا ومطلوب بقوة ويتمثل فى العمق.

صورة (1) حفر التافونى دائرية ومستطيلة الشكل، كما يلاحظ بداخلها الرواسب بجوار القم، كما يظهر الحائط الفاصل بينها.

صورة (2) حفر التافونى على ارتفاعات مختلفة، مختلفة الاحجام والأشكال. التصوير صوب الشرق

صورة (3) التحام حفر التافونى وتشكيل حفر أكبر حجماً على الحافة الشرقية لنهر النيل شرق المنيا. مرحلة الالتحام التصوير صوب الشرق.

صورة (4) حفر التافونى فى قواعد الجروف، ويلاحظ وجود أسقف لحفر التافونى والتحامها. التصوير صوب الشرق

صورة (5) حفر التافونى فى قواعد الجروف بمنطقة محاجر المنيا المهجورة حالياً، كما يلاحظ وجود النباتات فى مناطق الضعف الصخرى. التصوير صوب الشرق.

صورة (6) إحدى حفر التافونى كبيرة الحجم على الحافة الشرقية لنهر النيل شرق مدينة المنيا، ويلاحظ عدم وجود سقف لها، كما يلاحظ وجود انهيارات للكتل الصخرية الضعيفة بها. التصوير صوب الشرق

تحتوي المقارنة بين أوجه الجروف الموجودة في محجر المنيا وعلى حفر الطريق على نسب متنوعة مختلفة حيث وجدت اختلافات كبيرة، وتختلف النسب فى محاجر المنيا بشكل أكثر أهمية (p value < 0.05) من النسب فى حفر الطريق. حيث إن كل أوجه الجروف اصطناعية تقريبًا، وتتشكل حفر التافوني منذ ما يقرب من ٣٥ عامًا في نفس تكوين الصخر. والاختلافات في هذه النسب قد يكون بسبب الاختلافات الصغيرة في الصخر، واتجاه وكميات الرياح المختلفة التي يستقبلها الجرف. محاجر المنيا ليست مفتوحة بشكل كبير لأي نمط من الرياح المباشرة، مع أن المحاجر يتم حفرها في الأرض وتأخذ شكل تجويف إلى حد ما. وتتميز كل أوجه جروف محاجر المنيا بانحدارات مختلفة.

وحفر الطريق، بحكم تعريفها، مفتوحة على طرفي الطريق مع طريق أخر قادم في اتجاه عمودي قرب نهاية وجه الجرف. ويمكن للرياح أن تتحرك بحرية خلال الحُفر وتؤثر بسهولة على كل من أوجه الجروف في الوقت نفسه، وذلك خلافًا لأوجه جرف محجر المنيا حيث لا تواجه الرياح بنفس هذا المسار الدقيق ويجب أن تدخل وتدور حوله فى شكل دائرة بدون وجود مخرج جيد لها.

نتائج المقارنة للموقعين اظهرا أيضًا أن كل نسبة ماعدا ملء المربع المكشوف تكون مختلفة اختلافًا كبيرًا حيث قيمة (p value < 0.05). ويمكن أن يكون هذا أيضًا نتيجة لنمط الرياح المختلف جدًا والموجود في محجر المنيا وحفر الطريق. في المقارنة بين الموقعين، يبدو أن حفر التافوني في محاجر المنيا تكون

أكثر تحديدًا واستطالة، بينما تكون حفر التافوني أقل تحديدًا وتبدو فى شكل غير منتظم على طول حفر الطريق.

أسفرت المقارنة بين حفر التافونى الصغيرة والكبيرة أيضًا على ثلاثة من النسب التي تختلف اختلافًا كبيرًا حيث قيمة (p value < 0.05)، مع عدم وجود اختلافًا كبيرًا فقط فى نسبة العرض الخارجي على العرض الداخلي من حفر التافوني المكشوفة. وهذا يوضح في حدود هاتين النسبتين أن حفر التافوني الأكبر لا تتشكل بالضرورة على نفس مستوى الأبعاد بنفس النسبة.

ويبدو من خلال مقارنة كل من مجموعات البيانات لحفر التافوني الصغيرة أنه حتى حفر التافوني الأصغر لا تتشكل في نفس النمط، وتوضح أن النتيجة النهائية لحفر التافوني الكبيرة هي نفسها على الأقل بالنسبة لأنواع الصخور والظروف المناخية المتشابهة.

من الممكن أن تتشكل حفر التافوني الأصغر بصورة مستقلة وتواصل نموها في بعضها البعض مما يؤدي إلى تشكيل حفر التافوني الأكبر. ويُدعم الباحث هذه الفكرة بسبب وجود تشكيل لحفر التافوني في حفر التافوني الأكبر المنهارة حاليًا، صورة (٣). وتوجد ملاحظات أخرى في حفر التافوني الأكبر الفردية، والتي توضح نقاط متعددة أعمق داخل حفر التافوني؛ من الممكن أن هذه النقاط المتعددة الأعمق موازية أو مناظرة إلى تشكيل حفر التافوني الصغيرة في وقت واحد على طول واجهة

الجرف. وقد تشكلت حفر التافوني الصغيرة في الجدران التي لم تتراجع منذ ٣٥ عام، في حين أن حفر التافوني الكبيرة وجد أنها تتشكل في الجروف حيث تآكل وجه الجرف الأصلي إلى الخلف.

الشرفات والبروزات

يوضح الرسم البياني لحفر التافوني الصغيرة الشكل(٨ أ) نتائج العرض الخارجي/العرض الداخلي في غالبية نقاط البيانات التي تقع تحت خط واحد إلى واحد في الرسم البياني، ويدل هذا على أن غالبية حفر التافوني الصغيرة لم يكن لديها بروزات جانبية. إذا تم تعزيز تطور حفر التافوني بفعل الرياح وهذا أمر منطقي لأن البروزات الجانبية من شأنها أن تخلق عائق في مهب الريح.

يتبين أن النقاط التي توجد فوق الخط وعلى الخط معظمها قليلة، وأن البروزات الجانبية ضئيلة جداً. فقط ٦ من حفر التافوني المقاسة لديها بروزات مهمة، وهذا ما يتضح من خلال النقاط التي أزيلت بالفعل من سطر واحد إلى واحد.

يتضح من شكل (٨ ب) أن معظم البيانات تحت الخط مما يدل على أن معظم حفر التافوني الصغيرة ليس لديها شرفات رأسية أيضًا. وهناك العديد من النقاط التي تُعرض فقط فوق الخط، وتوضح أن هناك نسبة ضئيلة من حفر التافوني الصغيرة التي لديها شرفات رأسية. المزيد من النقاط فوق الخط التي تظهر في هذا الرسم البياني، والنقاط الأبعد من الخط، ممن كانت عليه في الرسم البياني الخاص

بالعرض. ويدل هذا على أن هناك الكثير من حفر التافوني الصغيرة يكون لديها أسقف معلقة رأسية أكثر من البروزات الجانبية.

يوضح شكل (٨ج) الخاص بحفر التافوني الكبيرة أن كل النقاط ما عدا نقطة واحدة من النقاط المرسومة توجد على أو تحت الخط واحد إلى واحد. وتفسير ذلك أن واحدة فقط من حفر التافوني الكبيرة كان لها سقفًا معلقًا رأسيًا. فقد يكون من الممكن أن طبيعة حفر التافوني الكبيرة المنهارة والمكسورة على طول خط البروز dripline سببًا في عدم وجود الأسقف المعلقة الرأسية.

- تصنيف (أنواع) حفر التافونى:

صنف الباحث حفر التافوني تبعًا لنتائج الخصائص المورفومترية السابقة إلى ثلاثة أنواع هي:

أولاً: تصنيف حفر التافونى حسب الحجم:

تختلف أحجام حفر التافوني اختلافًا كبيرًا من ملليمترات إلى مترات على نفس وجه الجرف الصخري؛ لذا يمكن تقسيمها إلى نوعين هما:

١- حفر التافونى الصغيرة:

يتراوح اتساعها من سنتيمتر إلى ديسيمتر، وتكون شبكية الشكل، والحفر تكون قريبة من بعضها نسبيًا عند مقارنتها بحفر التافوني الكبيرة. وأحيانًا تمتلك أثار حواف مرتفعة تحيط بمداخل الحفرة صورة (٢).

٢- حفر التافونى الكبيرة:

يتراوح اتساعها من ديسيمتر إلى متر، وفي كثير من الأحيان يكون لها سقف بارز متدلى من أعلى على شكل قوس، أو شرفات Visor. وترتبط الشرفات بحفر التافوني الكبيرة حيث تبرز وتتدلى الأسقف منها وتبدو وكأنها مظلة، علمًا بأنه ليس شرطًا أن يكون لكل حفر التافونى الكبيرة أسقف معلقة صورة (٧). ويشير وجود الأسقف المعلقة إلى شدة صلابة الطبقة الخارجية من حفر التافوني وبالتالي مقاومة أكبر لتجوية الصخر، وحالة تصلب الطبقة الخارجية ليس بالضرورة شرطًا مسبقًا بالنسبة لتطور الأسقف المعلقة. ويمكن أن تكون الأسقف المعلقة نتاج التجوية التفاضلية differential weathering في اتجاه تصاعدي وإلى الخلف.

ثانيًا: تصنيف حفر التافوني حسب الشكل:

تصنف حفر التافوني حسب الشكل إلى نوعين هما:

١- أقراص العسل Honey Comb:

عبارة عن حفر صغيرة، متقاربة المسافات البينية، وتتراوح أقطارها ما بين سنتيمتر إلى ديسيمتر، ودائرية إلى مستطيلة الشكل، فهي حفر تشبة الخلايا وتبدو على هيئة منخفضات مفصولة بحوائط واضحة المعالم. صورة (٢٢). ووضع (Viles, 2001) مقاييس خاصة لأقطار الحفر حيث تتراوح أقراص العسل بين مليمتر إلى سنتيمتر بينما تتراوح حفر التافوني من سنتيمتر إلى متر. ويستخدم مصطلح حفر التافوني وأقراص العسل كمصطلح لشئ واحد. لذا يصعب معرفة الاختلافات الدقيقة بين هذه الملامح. وتوصف أقراص العسل بإنها خلية محفورة فى الصخر.

وقد ميزَ الباحث ميدانيًا بين أقراص العسل وحفر التافوني حيث إن حفر التافوني يمكن حدوثها بصورة منفردة، بينما يجب أن توجد أقراص العسل فى شكل مجموعات.

٢- حفر التافونى المتداخلة Nested

رصد الباحث العديد من حفر التافوني متعددة الأجيال والأطوار، وتتراوح أقطارها من ملليمتر إلى ديسيمتر. حيث إن التجويفات الصغيرة في كثير من الأحيان تلتحم داخل تجاويف حفر التافوني الأكبر. وقد تم رصد حفر التافوني المتداخلة في منطقة الدراسة (صورة 3)، ويمكن أن تمتد لأكثر من ثلاثة أنواع من حيث الحجم (ملم إلى متر).

يتضح مما سبق أن هناك صعوبة أو خلط فى تحديد أنماط حفر التافوني، حيث إن كثير من الباحثين عرفوا حفر التافوني بواسطة أنماط مميزة أو عن طريق عمليات التجوية المميزة والعمليات الداخلية حيث يصلان إلى قلب الجدل الدائر حول هذا النمط من التجوية الجيولوجية. ويعرف Martini (1978)، نمط حفر التافوني على إنها أشكال أرضية تشير إلى ظروف التجوية والعمليات التي تؤدي إلى تشكيل وحفظ الشكل المورفولوجي. وأعتقد Martini أن حفر التافوني هى طبقة مستقلة، وهياكل هندسية متشابهة، والتي تشكلت بواسطة تشكيلة متنوعة ومتغيرة من عمليات التجوية الكيميائية والفيزيائية والبيولوجية.

صورة (7) توضح الأسقف المعلقة لحفر التافونى والحوائط الفاصلة بين حفر التافونى. التصوير صوب الشرق.

صورة (8) توضح إحدى حفر التافونى الكبيرة على الحافة الشرقية لنهر النيل وعلى منسوب مرتفع. ويلاحظ عملية التقعر وتشكيل حفر التافونى الصغيرة جداً. التصوير صوب الشرق

صورة (9) حفر التافونى دائرية الشكل، وتوضح مرحلة التحام الحفر وظهور حفر داخل الحفر الخارجية بعمق كبير، كما يلاحظ الحوائط الفاصلة بينها. التصوير صوب الشرق.

صورة (10) توضح مرحلة الالتحام لحفر التافونى حيث انهيار الجدار الفاصل بين الحفر وتشكيل حفر اكثر اتساعاً.

صورة (11) توضح انتشار حفر التافونى فى وجه الحافة الرأسية الشرقية لنهر النيل شرق المنيا، ويلاحظ وجودها على منسوب مرتفع فى مناطق الشقوق والفواصل. التصوير صوب الشرق.

صورة (12) توضح انتشار حفر التافونى فى وجه الحافة الرأسية الشرقية لنهر النيل شرق المنيا، ويلاحظ وجودها على منسوب مرتفع ، كما يظهر السهل الفيضى الشرقى الذى تطل عليه الحافة مباشرة. التصوير صوب الشرق.

التمييز بين حفر التافوني وبعض أنواع الحفر التكهفية الأخرى:

تجدر الإشارة فى الدراسة الحالية نتيجة للخلط فى تحديد أنماط حفر التافوني إلى ضرورة التمييز بين حفر التافوني وبين أشكال الحفر التكهفية الأخرى كما يلي:

١- الكهوف الكارستية Karst Caves:

يظهر شكل الكارست مُختلفًا عن حفر التافوني؛ حيث إن شكل الحوائط التي تفصل بين الحفر الكارستية تبدو حادة وتجاويفها تميل إلى أن تكون ضحلة نسبيًا. وتكون التضاريس الكارستية غالبًا خشنة أو مُسننة، والتجوية الملحية التي تُنشأ القنوات التي تفصل بين الحافات تكون حاده، بينما تظهر حفر التافوني فى هيكلها المستدير والحوائط التي تفصل بينها تكون ناعمة أو مصقولة وتجويفها يبدو عميقًا نسبيًا.

٢- الكهوف الساحلية Littoral Caves:

ليست أنواع من حفر التافوني؛ لأنها نشأت أساسًا بفعل قوى التآكل بدلًا من عمليات التجوية الفيزيائية، والكيميائية، والبيولوجية.

٣- الحفر الوعائية Potholes:

تميل إلى الحدوث على الأسطح الأفقية بدلًا من الأسطح المائلة. وتتطور على اليابس نتيجة تدفق مياة البحر أو النهر إلى جانب فعل طحن الرمل، والحصى، والصخور، وتختلف هندسيًا عن حفر التافوني.

٤- الحفر البيولوجية أو حفر الحيوانات الحافرة Borings Pholad:

تحدث في نمط حزم أو مجموعات ويتم إنشاؤها فى صورة تكهفات بيولوجية تشبة حفر التافوني. حيث إن التفاعلات البيوكيميائية والفيزيائية للكائن الحي داخل التجويف يجعلها المُسبب القوي لتلك التجويفات. ولكن قد تسيطر وتهيمن القوى التحاتية على تشكيلها وفي هذه الحالة لا يكون سبب تشكيلها راجعًا إلى التجوية ولكن يرجع إلى أحد قوى التحات. وتبدو التجاويف عميقة بشكل غير عادي بالنسبة لُقطر فتحاتها مقارنة بحفر التافوني من نفس النطاق فى تكوينات الحجر الجيرى المشابهة، ويدل هذا على أن الحفر البيولوجية يتم تعميقها بسرعة، أو يتم حفرها بواسطة الحيوانات الحافرة.

- مراحل تطور حفر التافوني:

تتطور مع امتداد مرور الزمن، وتتراوح من العقود إلى ملايين السنين اعتمادًا على الظروف المناخية والصخرية. ويبدو أن حفر التافوني الأكبر حجمًا تكون أكثر شيوعًا في البيئات الجافة كما فى منطقة الدراسة الحالية، وحفر التافوني الأصغر أكثر مثالية في المناطق الأرطب.

تطور نمط تجوية حفر التافوني:

ينبغى معرفة كيف وأين يبدأ الشروع فى نشأة حفر التافوني. ويعتقد الباحث أن نمط تجوية حفر التافوني هو نمط ناشئ في الطبيعة، وهو رد طبيعي للطاقة المستخدمة لتعرية بعض الصور الطبيعية للصخر. ويؤثر عدم التجانس الصخري والبنيوى فى تطور حفر التافوني، مثل:

صورة (13) أحد كهوف التافونى الكبيرة المسقوفة بالحافة الشرقية لنهر النيل شرق المنيا. يلاحظ اتساع فتحته وعمقه وتراكم الكتل الصخرية المنهارة فى مدخله وبداخله. التصوير صوب الشرق

صورة (14) توضح إحدى حفر التافونى الكبيرة غير مسقوفة، كما يلاحظ تشكيلها فى مناطق الشقوق والفواصل. التصوير صوب الشرق.

صورة (15) إحدى حفر التافونى كبيرة الحجم غير المسقوفة وعميقة جداً، وتظهر على منسوب مرتفع. وتمثل مرحلة حفر التافونى التصوير صوب الشرق.

صورة (16) توضح مرحلة البقايا لحفر التافونى، حيث ينهار الجدار الفاصل بين الحفر وتكاد تختفى معالمها كما يظهر فى منطقة القاع الجاف. وتبدو كمجارى ملتوية.

صورة (17) توضح وجود حفرتين كبيرتين من حفر التافونى على الحافة الشرقية لنهر النيل أمام كوبرى المنيا الذى يربط غرب المنيا بشرقها، ويلاحظ مدى خطورة الكتل المنهارة من الحفر على الطريق. التصوير صوب الشرق.

صورة (18) توضح مدى اقتراب الحافة الشرقية التى تنتشر بها حفر التافونى من الطريق ومدى خطورتها عليه فى حالة انهيار الكتل الصخرية من حفر التافونى. التصوير صوب الشرق.

وجود الفواصل، والطبقية، والتغيرات البنيوية الأخرى وافتراض أن حفر التافوني توجد بشكل عشوائي مع عدم وجود اتجاه مفضل لنموها، وتميل إلى أن تحدث في نقطات ميكروسكوبية عشوائية من الضعف المعدني.

يؤكد كل من (Turkington,A.V., Phillips, J.D., 2004) على دور النظم الفيزيائية والكيميائية المعقدة "لعدم الاستقرار الديناميكي والتنظيم الذاتي" فى التحكم فى تطور حفر التافوني.

وتتبنى هذه النظرية تطور حفر التافوني بطريقة ذاتية أو طبيعية (أى تنشأ بلا سبب خارجي واضح)، وحتى الآن غير معروف الشروط الأولية التي تعمل على زيادة مساحة سطح الصخر من خلال زيادة عدد التجاويف المدورة. ومن المُثير للاهتمام، أن الباحث وجد على نطاق الحافة الشرقية شرق المنيا، إن سطح الصخر يزداد في المساحة السطحية من خلال الزيادة الكبيرة فى عدد التجويفات، وحفر التافوني الفردية تقلل المساحة السطحية للصخر عن طريق التنعيم وصقل الصخر، والشكل المستدير. وربما يبدأ نمط تجوية حفر التافوني في نقاط الضعف الصخري الميكروسكوبية وفي مناطق ذات نفاذية عالية.

مراحل تطور حفر التافونى:

اعتمد الباحث فى دراسته لتطور حفر التافوني على الملاحظات الميدانية والتصوير الفوتوغرافي، والبيانات المورفومترية التي تُدعم التسلسل التطوري لشكل حفر التافوني. ويمكن تنظيم نمط تجوية حفر التافونى إلى مراحل ذات مغزى إحصائي. حيث تم تعريف المراحل عن طريق متوسط نسب قياسات التجويف مثل العرض والعمق والارتفاع إضافة إلى شكل الفتحات وذلك بالنسبة للمرحلة الثالثة أي مرحلة حفر التافوني، مع تعريف بقية المراحل الأخرى عن طريق الحجم وشكل فتحات التجويف بدون العمق. وفيما يلي نموذج مقترح لتطور حفر التافوني.

١- مرحلة البداية:

تتعرض فيها الصخور السطحية لعمليات التجوية المختلفة وتظهر عليها ألوان مختلفة. وتتميز هذه المرحلة بعدم وجود حفر تافوني لها صفات مميزة أو تجويفات. ولكنها تشير إلى نشاط التفكك الحبيبي فى خفض هذه الأسطح الصخرية. صورة (٢١). كما تتصف بعدم وجود صفات تشبة حفر التافوني، مثل الحفر الصغيرة، والفجوات، والفتحات، والجداول المموجه، والحافات.

٢- مرحلة التنقير أو الحفر الصغيرة جداً:

يتم تنقير الصخور السطحية في هذه المرحلة، وربما يبدأ تشكيل الحُفر بشكل عشوائي في أماكن المسامية العالية أو النفاذية العالية حيث تتشكل الحُفر الصغيرة جدًا فى مناطق المعادن الصخرية الضعيفة، والتي تكون عُرضة بشكل خاص لعمليات التآكل الكيميائي أو فى أماكن الاختلافات الطبوغرافية الدقيقة، والتي غالبًا تكون على طول الأسطح الطباقية Bedding planes والفواصل. ونظرًا لترتيب وتنظيم فراغات الأسطح الصخرية، ومناطق التنقير الشديدة التي تُشكل نسيج بنية أقراص العسل.

صورة (19) توضح ظهور حفر التافونى فى وجه الحافة الشرقية فى مناطق الشقوق والفواصل بينما تختفى فى قواعدها بسبب نمو النباتات التى قد تحمى قاعدة الحافة من عمليات النحت بفعل الرياح. التصوير صوب الشرق

صورة (20) توضح اقراص العسل فى وجه الحافة الشرقية لنهر النيل شرق المنيا، يلاحظ التحام الحفر، كما يلاحظ وجود صواعد وهوابط زائفة. التصوير صوب الشرق.

صورة (21) توضح مرحلة البداية لتشكيل حفر التافونى

صورة (22) توضح اقراص العسل أو مرحلة تكون الحفر الصغيرة جداً.

صورة (23) توضح حفر الطريق بمنطقة محاجر المنيا

ويقترب قطر فتحة التجويف من ٢ سم أو أقل من ٢ سم. وتُعد تجوية هذه الحُفر الصغيرة بمثابة مواضع النويات الأولى لحفر التافوني. صورة (٢٢).

٣- مرحلة حفر التافونى:

تستمر عملية الحَفر وتوسيع الحُفر الصغيرة التي تكونت فى مرحلة التنقير، حيث تتسع الحُفر الصغيرة وتتطور انتقائيًا بشكل مختلف، وتتشكل تجويفات كاملة الاستدارة، والتي تُعرف بحُفر التافوني، حيث تنمو حفر التافوني بشكل أعمق من نموها بشكل أوسع خلال هذه المرحلة (يزاد عمقها بشكل أكبر من اتساعها فى هذه المرحلة). وغالبًا تكون غير منتظمة أو كمثرية الشكل، ولا توجد بها زوايا ركنية، ولا يوجد بقايا لجدران داخل التجويفات. كما يلاحظ حالة تصلب حوافها التي تتشكل حول فتحات حفر التافوني المشكلة فى الحجر الجيرى، ويكون قطر فتحة التجويف أكبر من ٢ سم. الصورة من (١١ – ١٥).

قد تصل حفر التافوني إلى فترة من الاستقرار القصوى قبل التحامها وتطورها إلى المرحلة الرابعة؛ وعند هذه النقطة حفر التافوني تصل إلى العمق الحرج، وتبدو مدورة جيدًا مع ثبات تكرار حفر التافوني في منطقة السطح. وقد تُمثل هذه المرحلة أيضًا الفترة التي تمتاز بها حفر التافوني بالتنظيم الذاتي الجيولوجى، وهو يعني نمط النشأة للظاهرة في الطبيعة الذي لا يزال قائمًا نظرًا للظروف الصخرية والمناخية المناسبة. وعندما يظهر نمط التحام حفر التافونى بسبب الخصائص الجوهرية أو الفعلية للصخور (Turkington, A. V., Phillips, J.D., 2004) بدلاً من العوامل خارج هذا النظام.

٤- مرحلة الالتحام:

تتميز حفر التافوني بأنها أكثر اتساعًا وعمقًا وحجمًا، وتستمر عملية توسيع حُفر التافوني إلى أن تبدو الحوائط الفاصلة بين حفر التافوني على شكل تقاطعات رقيقة جدًا وبارزة، وليست كاملة الاستدارة، ورفيعة نسبيًا، وعندما يقل سُمك الحوائط التي تفصل بين حفر التافوني عن ٣ ملم فإنها تضعف، وحينئذ يحدث انهيار مفاجئ لتلك الحوائط الفاصلة، وتندمج وتلتحم حفر التافوني تدريجيًا بعضها البعض ببطئ أو بسرعة من خلال الاضطرابات المفاجئة. وبمجرد أن يتم إزالة الحائط تنتقل الطاقة في النظام من تعميق الحُفر إلى إضعاف حوائط الحُفر الباقية. والدليل على حُفر التافوني هو وجود الحوائط بداخل التجويفات. الصورتان (١١، ١٢).

٥- مرحلة البقايا:

بعد تكسر وانهيار حوائط حفر التافوني وتلاحم الحُفر ببعضها فإنها تترك وراءها حوائط بارزة وجداول متعرجة كبقايا على مكانها السابق. وفي بعض الأحيان تكون هذه البقايا أكثر قدرة على المقاومة مما يؤدي إلى استمرار هذه الجداول المتعرجة على وضعها الطبيعى ويمكن أن تصل إلى الجداول المجاورة، وتشكل بفعالية حوائط جديدة. ويبدو أن بقايا حوائط حفر التافوني تنخفض إلى مستوى الجزء الخلفي من التجاويف أو الحفر الموجودة سابقًا.

وبذلك تختفي ملامح الحُفر الصغيرة، والتجويفات، والفتحات، والكهوف، بينما يُستدل على حفر التافوني من خلال تلك البقايا، حيث تكون الملامح التكهفية ناعمة ومستديرة. وربما الفطريات على جدران حفر التافوني أيضًا تمنع أو تُبطئ التآكل. صورة (١٦). ثم تبدأ عملية تشكيل حفر التافوني مرة أخرى بنفس المراحل السابقة وهكذا.

ومن خلال العرض السابق لتطور حفر التافوني فى الحجر الجيري بمنطقة الدراسة يُمكن تكشُف النقاط التالية:

١- تبدأ حفر التافوني بحفرة، وتُعمق بشكل انتقائي، وتلتحم ببعضها عن طريق خرق وتخفيض الجدار الفاصل بينها، وتُشكل حينئذ حفر أكثر ضخامة و تحتوي غالبًا على حفر تافوني أصغر بداخلها.

٢- حفر التافونى انتقائية، بمعنى إنها لا تتشكل على جميع أنواع الصخور في جميع الظروف المناخية.

٣- معدلات تعميق حفر التافونى يمكن أن تكون سريعة، وتصل إلى ١,٤ ملم / السنة، وتقدر أنها تأخذ ما بين ١٠٠ إلى ٤٠٠ سنة لكي تكبر الحفرة وتتطور وتصل إلى المرحلة الثالثة (Turkington,A.V., Phillips, J.D.,2004) من مراحل تطور حفر التافوني حيث يصل عمقها حوالي ٤ سم. ولكن معظم معدلات تعميق حفر التافونى التي تم قياسها بمنطقة الدراسة تتراوح فى المتوسط بين حوالي ٠,١ – ٠,٦ مم/السنة.

٤- انهيار الحائط قد يكون مؤشرًا على نهاية تعميق حفر التافوني أو على الأقل يدل على تباطؤ في معدلات تعميقها، ويكون تعميق الحائط الرقيق بين حفر التافوني أبطأ بكثير من تعميق الحائط الخلفى منها.

٥- تبرز أحيانًا الحوائط من الصخور نفسها لأن سطح الصخرة حول هذه المناطق يكون أكثر مقاومة ويكون تخفيض منطقة الحائط تفاضليًا. وفي حالات أخرى، قد تمنع الطلاءات الحيوية البيولوجية تخفيض الحائط وانهياره.

٦- في منطقة الدراسة، تبدو حفر التافوني كتراجع في الطبقات، وعمليات تجوية حفر التافوني تبدو لحساب نسبة كبيرة من تراجع الحافة الجيرية في شرق مدينة المنيا.

تشكيل حفر التافوني:

تتشكل حفر التافوني في مناطق محددة جدًا في منطقة الدراسة. حيث تتشكل حفر التافوني كبيرة الحجم على طول أوجه جروف الحافة الشرقية شرق مدينة المنيا التي تتعرض عادة بشكل مباشر لهبوب الرياح الشمالية الغربية – الجنوبية الشرقية، والتي تُدعم بعملية التلاحم. أما حفر التافوني صغيرة الحجم فيمكن أن تتشكل فى ملامح الجروف الاصطناعية، أو حتى في المباني، حيث تتم حمايتها مرة أخرى من عملية الكربنة ويمكن أن يستمر تطورها. وربما تتشكل حفر التافوني الكبيرة نتيجة تآكل حفر التافوني الصغيرة في كل مناطق السطح الكبيرة الأخرى،

وزيادة معدل التآكل. وحفر التافوني الكبيرة يبدو أيضًا أن لها عمق محدد، والتطور الأعمق يتم عندما ينهار الجرف الذي يدعمها وتصبح مكشوفة بدون أسقف.

ويفترض أصلًا أن حفر التافوني فى هذه الدراسة التي سيتم تشكيلها من عملية الأسفين الملحي salt wedging أو غيره من تبخر أسافين الكريستال ومع ذلك، فإن عدم وجود متبخرات حاليًا خارج هذه القواعد باعتبارها آلية لتشكيل حفر التافوني في منطقة الدراسة. والبيانات التي تم جمعها وضعت النحت بفعل الرياح كآلية تشكيل محتملة لحفر التافوني، وعلى الرغم من أنها توضح أيضًا أن كميات الرياح لا تحتاج إلى أن تكون قوية بما يكفي لإزالة الرواسب فعليًا، وتعزز فقط تجوية السطح، وهو ما يمكن ملاحظته في محجر المنيا وفي حفر التافوني الكبيرة.

الاستنتاجات والخاتمة:

من خلال دراسة حفر التافوني ومقارنة بعضها البعض أمكن التحقق من اختبار فرضيات الدراسة كما يلى:

الفرضية الأولى تتشكل حفر التافونى على الحافة الشرقية لنهر النيل شرق مدينة المنيا.

تم العثور على حفر تافونى تتشكل على الحافة الشرقية لنهر النيل شرق مدينة المنيا، مما يؤكد تشكيل حفر التافونى في صخور الحجر الجيرى.الفرضية الثانية: حفر التافونى الكبيرة لا تختلف مورفومترياً فى مختلف الصخور. تم تقسيم حفر

التافونى الكبيرة على الحافة الشرقية لنهر النيل شرق مدينة المنيا إلى نوعين نسبة إلى عمر الصخور بين صخور الهولوسين وصخور البلايستوسين. ثم قورنت مع بعضها البعض لتحديد أي فروق ذات دلالة إحصائية بين حفر التافونى التى تتراوح أعمارها بين الصخور المختلفة. لم يتم العثور على اختلافات كبيرة. وقد يكون ذلك لأن الجروف التى توجد بها مجموعات حفر التافونى قد تشكلت فى نفس الوقت بغض النظر عن عمر الصخور.

الفرضية الثالثة: تتباين مورفومترية حفر التافونى الكبيرة عن حفر التافونى الصغيرة.

أظهرت النتائج إلى وجود اختلافات مورفومترية بين أنواع حفر التافونى كلها، مع استخدام نسب متعددة مما أدى إلى أفضل الاختلافات. حيث تم قياس ٢٠٠ حفرة تافونى صغيرة من اثنين من الملامح الثقافية، فى محاجر المنيا وحفر الطريق. المقارنات في هذه القياسات تبين أنه لا يوجد نمط في شكل حفر التافونى الصغيرة عند مقارنة قياسات داخل ومداخل الحفر، ومع ذلك، ظهرت الأنماط عندما تم إضافة عمق الحفر إلى المعدلات، ومقارنة حفر التافونى من خلال ثلاثة أبعاد.

الفرضية الرابعة: يرتبط تشكيل حفر التافونى الكبيرة بتشكيل حفر التافونى الصغيرة.

المقارنة بين حفر التافونى الصغيرة والكبيرة أظهرت أيضاً عدم وجود أي نمط حقيقي لتطور حفر التافونى، وجميع المعدلات باستثناء واحد، وهو نسبة العرض الخارجي إلى العرض الداخلي بالنسبة لحفر التافونى المكشوفة، وبالنظر إلى معدلات مقارنة حفر التافونى الصغيرة بنفسها فقط، فتوضح من خلال بعدين فقط أنه لا يوجد نمط موحد لتطور حفر التافونى. ومع ذلك، بمجرد مقارنة المعدلات إلى عمق الحفر، فقد اظهرت المقارنات تشابها بينها. ومع ذلك، هناك بعض الأدلة التي تدعم فكرة أن حفر التافونى الصغيرة تنمو معاً لتشكيل حفر التافونى الكبيرة، لذلك قد يكون من المحتمل عدم وجود نمط حقيقي، لأن حفرة تافونى صغيرة واحدة لا تنمو لتشكل حفرة تافونى كبيرة واحدة. الحجم الخام تقريباً يوضح أن حفر التافونى الصغيرة تنمو بمعدل أبطأ من حفر التافونى الكبيرة، والذي يمكن أيضاً أن يكون سبباً فى بعض الاختلافات بين هذين النوعين من حفر التافونى.

الفرضية الخامسة: يرتبط تشكيل حفر التافونى بالنمو البلورى للمعادن، أو بفعل الرياح وعمليات النحت الهوائية عندما تُخرق الطبقة السطحية المقاومة للنحت. حفر التافونى فى صخور الحجر الجيرى بمنطقة الدراسة، يبدو أن يتم تشكيلها بواسطة آليات تشكيلية مُعترف بها لتشكيل حفر التافونى من المناطق الأخرى. وأظهر التحليل البتروجرافى لعينات حفر التافونى أيضاً عدم وجود متبخرات حالياً، مما يجعل من المُستبعد تماماً تثبيت أن تكون البلورات آلية تشكيل حفر التافونى في صخور الزمن الرابع فى منطقة الدراسة. نتائج مقارنات حفر التافونى، مع اتجاهات

الرياح المختلفة، وتحليل اتجاهات الرواسب في عينات الحفر، تشير إلى التعرية بفعل الرياح، وامكانية أن يكون النحت الريحى هو آلية تشكيل حفر التافونى في هذا الموقع. شكل المنخفضات فى محاجر المنيا يمنع أو يقلل من كمية وسرعة الرياح التي يمكن أن تكون موجودة حالياً لتشكيل حفر التافونى. هذا إلى جانب حقيقة أنه على الرغم من جمع الرواسب في عينات الحفر، الا انها لا تزال موجودة، وبالتالي، فإن كمية الرياح اللازمة لتحقيق تطور حفر التافونى ليست كمية كبيرة.

لم يعثر على أدلة خلال هذه الدراسة تشير إلى ان عمليات الاذابة التقليدية للكهوف تدعم تشكيل حفر التافونى في هذا الموقع. ولذلك، فإن ملامح حفر التافونى على الحافة الشرقية لنهر النيل شرق مدينة المنيا، تمثل ملامح الكارست التقليدية الزائفة، وليس شكلاً جديداً من أشكال الكارست التقليدية أو الكارست الزائفة.

توجد استنتاجات إضافية، حيث إن نتائج هذه الدراسة تشمل بيانات من الخصائص الثقافية، مثل محاجر المنيا وحفر الطريق، وظهور حفر التافونى في كتل المبانى والملامح الثقافية الأخرى.

ملحق (١) بيانات حفر التافوني الصغيرة المنتشرة على الحافة الشرقية لنهر النيل

رقم الحفرة	العرض الخارجى (م)	العرض الداخلى (م)	الارتفاع الخارجى (م)	الارتفاع الداخلى (م)	العمق (م)	معدل العرض الخارجى/ العرض الداخلى (م)	معدل الارتفاع الخارجى/ الارتفاع الداخلى (م)	معدل الارتفاع الداخلى / الارتفاع الخارجى (م)	معدل الارتفاع الخارجى/ العرض الخارجى (م)	معدل الارتفاع الداخلى/ العرض الداخلى (م)	معدل الارتفاع الخارجى/ الارتفاع الداخلى / العمق (م)	معدل الارتفاع الداخلى/ العرض الداخلى/ العمق (م)	معدل الارتفاع الخارجى/ العرض الخارجى/ العمق (م)	معدل العرض الخارجى/ العرض الداخلى/ العمق (م)	معدل العرض الداخلى/ العرض الخارجى/ العمق (م)
١	٠,١٣	٠,١٣	٠,٠٧	٠,٠٧	٠,٠٥	١	١	١	٠,٥	٠,٥	٢٠	١٠,٨	١٠,٨	٢٠	٢٠
٢	٠,٣٥	٠,٣٥	٠,١٥	٠,١٥	٠,٠٦	١	١	١	٠,٤	٠,٤	١٦,٧	٧,١	٧,١	١٦,٧	١٦,٧
٣	٠,٢٥	٠,٣٣	٠,١٥	٠,١٣	٠,٥٠	٠,٨	٠,٩	١,٢	٠,٤	٠,٠٦	٢,٣	١,٢	٠,٨	١,٥	٢,٦
٤	٠,١٣	٠,١٠	٠,٠٥	٠,٢	٠,٠٤	١,٣	٤	٠,٣	٢	٠,٤	٦,٣	٩,٦	٥٠	٣٢,٥	١٩,٢

٥	٠,٨١	٠,٧٥	٠,١٣	٠,١١	٠,٠٩	١,١	٠,٨	١,٢	٠,٢	٠,١	١٣,١	١,٦	١,٨	١٢	١٠,٣
٦	٠,٥٥	٠,٤٥	٠,١٨	٠,١٠	٠,٥٠	١,٢	٠,٦	١,٨	٠,٣	٠,٢	٣,٦	٠,٤	٠,٧	٢,٤	١,٦
٧	٠,٩٠	٠,٥٠	٠,٢١	٠,١٠	٠,٨٠	١,٨	٠,٥	٢,١	٠,٢	٠,٢	٢,٦	٠,٣	٠,٣	٢,٣	٠,٧
٨	٠,١٩	٠,٢٢	٠,١٧	٠,١٠	٠,٨٠	٠,٩	٠,٦	١,٧	٠,٩	٠,٥	٢,١	٠,٦	١,١	١,١	١,٤
٩	٠,٧٤	٠,٥٦	٠,٣١	٠,١٦	٠,١٥	١,٣	٠,٥	١,٩	٠,٤	٠,٣	١٢,٩	١,٩	٢,٨	٨,٨	٥
١٠	٠,٦٩	٠,٤٠	٠,٥٧	٠,٣٤	٠,٢٠	١,٧	٠,٦	١,٧	٠,٨	٠,٩	٨,٤	٤,٣	٤,١	٨,٦	٢,٩
١١	٠,٧٠	٠,٤٩	٠,٣٠	٠,٢٠	٠,٢٣	١,٤	٠,٧	١,٥	٠,٤	٠,٤	٦,٥	١,٨	١,٩	٦,٢	٣
١٢	٢,٧١	١,٠٨٣	٠,٨٠	٠,٥٥	٠,٣٧	٢,٥	٠,٧	١,٥	٠,٣	٠,٥	٣,٩	١,٤	٠,٨	٦,٨	١,١
١٣	١,٠٥	٠,٨٤	٠,٣٥	٠,٢٥	٠,٥٠	١,٣	٠,٧	١,٤	٠,٣	٠,٣	٢,٨	٠,٦	٠,٧	٢,٥	١,٦
١٤	٢,٨٥	٢,٨٥	٠,٣١	٠,١٨	٠,٢٠	١	٠,٦	١,٧	٠,١	٠,١	٨,٦	٠,٣	٠,٥	٥	٥
١٥	٠,٧٨	٠,٧٨	٠,٠٨	٠,٠٦	٠,٠٧	١	٠,٨	١,٣	٠,١	٠,١	١٩	١,١	١,٥	١٤,٣	١٤,٣
١٦	٠,٤٥	٠,٣٠	٠,١٨	٠,١٣	٠,٩٠	١,٥	٠,٧	١,٤	٠,٤	٠,٤	١,٥	٠,٥	٠,٤	١,٧	٠,٧
١٧	٠,٤٠	٠,٤٠	٠,٤٣	٠,٤١	٠,٢٥	١	١	١	١,١	١	٤,٢	٤,١	٤,٣	٤	٤
١٨	٠,١٠	٠,٥٠	٠,١٤	٠,٩٠	٠,٠٦	٠,٢	٦,٤	٠,٢	١,٤	١,٨	٢,٦	٣٠	٢٣,٣	٣,٣	٨٣,٣
١٩	٠,٠٨	٠,٠٥	٠,١٤	٠,٩٠	٠,٦٠	١,٦	٦,٤	٠,٢	١,٨	١٨	٠,٣	٣٠	٢,٩	٢,٧	١
٢٠	١,٠٤	١,٠٤	٠,٣٠	٠,٣٠	٠,١٣	١	١	١	٠,٣	٠,٣	٧,٧	٢,٢	٢,٢	٧,٧	٧,٧
٢١	٠,٢٥	٠,٢٨	٠,١٣	٠,١٣	٠,٠٨	٠,٩	١	١	٠,٥	٠,٥	١٢,٥	٥,٨	٦,٥	١١,٢	١٤

٢٢	٠,٣٥	٠,٣٥	٠,٣٥	٠,٣٠	٠,٩٠	١	٠,٩	١,٢	١	٠,٩	١,٣	١	١,١	١,١	١,١
٢٣	٠,٧٨	٠,٨٣	٠,١٥	٠,١٥	٠,٠٨	٠,٩	١	١	٠,٢	٠,٢	١٢,٥	٢,٣	٢,٤	١١,٧	١٣,٣
٢٤	٠,٤٠	٠,٣٧	٠,٥٥	٠,٣٧	٠,٢٥	١,١	٠,٧	١,٥	١,٤	١	٥,٩	٤	٥,٥	٤,٣	٣,٧
٢٥	٠,١٦	٠,١٨	٠,١٠	٠,٠٦	٠,٠٨	٠,٩	٠,٠٦	١,٧	٠,٠٦	٠,٣	٢٠,٨	٤,٢	٧,٨	١١,١	١٤,١
٢٦	٠,٤٨	٠,٤٥	٠,٢٢	٠,٣٣	٠,٢١	١,١	١,٥	٠,٧	٠,٥	٠,٧	٣,٢	٣,٥	٢,٢	٥,١	٤,٥
٢٧	٠,١٦	٠,١٦	٠,١٥	٠,١٥	٠,١٤	١	١	١	٠,٩	٠,٩	٧,١	٦,٧	٦,٧	٧,١	٧,١
٢٨	٠,٦٨	٠,٦٨	٠,٢٤	٠,٢٤	٠,١٢	١	١	١	٠,٤	٠,٤	٨,٣	٢,٩	٢,٩	٨,٣	٨,٣
٢٩	٠,٢٤	٠,٢٥	٠,١١	٠,١١	٠,٠٦	١	١	١	٠,٥	٠,٤	١٦,٧	٧,٣	٧,٦	١٦	١٧,٤
٣٠	٠,٢٢	٠,٢٩	٠,٣٠	٠,٣٠	٠,١٧	٠,٨	١	١	١,٤	١	٥,٩	٦,١	٨	٤,٥	٧,٨

ملحق (٢) بيانات حفر التافوني الصغيرة المنتشرة على جروف محاجر المنيا

رقم الحفرة	العرض الخارجى (م)	العرض الداخلى (م)	الارتفاع الخارجى (م)	الارتفاع الداخلى (م)	العمق (م)	معدل العرض الداخلى/ العرض الخارجى	معدل الارتفاع الداخلى/ الارتفاع الخارجى	معدل الارتفاع الخارجى/ العرض الداخلى	معدل الارتفاع الداخلى/ العرض الخارجى	معدل الارتفاع الخارجى/ الارتفاع الداخلى / العمق (م)	معدل الارتفاع الداخلى/ العرض الداخلى	معدل الارتفاع الخارجى/ العرض الخارجى	معدل العرض الداخلى/ العمق(م)	معدل العرض الخارجى/ العمق(م)
١	٠,٣٨	٠,٤١	٠,٦١	٠,٦١	٠,٢٥	٠,٩٣	١	١	١,٦١	١,٤٩	٤	٥,٩٥	٦,٤	٣,٧	٤,٣
٢	٠,٥٧	٠,٥٧	٠,٠٩	٠,٠٩	٠,٠٦	١	١	١	٠,١٦	٠,١٦	١٦,٧	٢,٦٣	٢,٦	١٦,٧	١٦,٧
٣	٠,١٦	٠,١٦	٠,١٠	٠,١٠	٠,٠٦	١	١	١	٠,٦٣	٠,٦٣	١٦,٧	١٠,٤	١٠,٤	١٦,٧	١٦,٧
٤	٠,١٨	٠,١٨	٠,٢٨	٠,٢٨	٠,٠٥	١	١	١	١,٥٦	١,٥٦	٢٠	٣١,١	٣١,١	٢٠	٢٠
٥	٠,٥٧	٠,٥٧	٠,٢٧	٠,٢٨	٠,١٠	١	٠,٩٦	١,٠٤	٠,٤٩	٠,٤٧	٩,٦٤	٤,٩	٤,٧	١٠	١٠
٦	٠,١٤	٠,١٥	٠,٠٨	٠,٠٨	٠,٠٤	٠,٩٣	١	١	٠,٥٣	٠,٥٧	٢٥	١٣,٣	١٤,٣	٢٣,٣	٢٦,٨
٧	٠,١٤	٠,١٤	٠,٠٦	٠,٠٦	٠,٠٥	١	١	١	٠,٤٣	٠,٤٣	٢٠	٨,٥٧	٨,٦	٢٠	٢٠
٨	٠,٨٥	٠,٨٥	٠,٣١	٠,٣٢	٠,١٥	١	٠,٩٧	١,٠٣	٠,٣٨	٠,٣٦	٦,٤٦	٢,٥١	٢,٤	٦,٧	٦,٧
٩	٠,١٣	٠,١٣	٠,١١	٠,١١	٠,٠٤	١	١	١	٠,٨٥	٠,٨٥	٢٥	٢١,٢	٢١,٢	٢٥	٢٥
١٠	٠,٢٧	٠,٢٩	٠,٠٨	٠,٠٩	٠,٠٨	٠,٩٣	٠,٨٩	١,١٣	٠,٣١	٠,٣٥	١١,١	٣,٨٨	٣,٧	١١,٦	١٣,٤
١١	٠,١٥	٠,١٧	٠,٢٠	٠,٢١	٠,١٠	٠,٨٨	٠,٩٥	١,٠٥	١,٢٤	١,٣٣	٩,٥٢	١٢,٤	١٣,٣	٨,٨	١١,٣
١٢	٠,٣١	٠,٣١	٠,٢٥	٠,٢٥	٠,١٠	١	١	١	٠,٨١	٠,٨١	١٠	٨,٠٦	٨,١	١٠	١٠

١٣	٠,٣٨	٠,٤٤	٠,١٠	٠,١١	٠,٠٣	٠,٨٦	٠,٩١	١,١٠	٠,٢٦	٠,٢٥	٣٠,٣	٨,٣	٨,٨	٢٨,٨	٣٨,٦
١٤	٠,٣٦	٠,٣٦	٠,٢١	٠,١٦	٠,١٣	١	١,٣١	٠,٧٦	٠,٥٨	٠,٤٤	١٠,١	٣,٤	٤,٥	٧,٧	٧,٧
١٥	٠,١٨	٠,٢٢	٠,١٣	٠,١٨	٠,٢٥	٠,٨٢	٠,٧٢	١,٣٨	٠,٧٢	٠,٨٢	٢,٨٩	٣,٣	٢,٩	٣,٣	٤,٩
١٦	٠,٢٠	٠,٢٠	٠,١٤	٠,٣٠	٠,١١	١	٠,٤٧	٢,١٤	٠,٧٠	١,٥٠	٤,٢٤	١٣,٦	٦,٤	٩,١	٩,١
١٧	٠,٢٣	٠,٢٣	٠,١٦	٠,٢٣	٠,١٣	١	٠,٧٠	١,٤٤	٠,٧٠	١	٥,٣٥	٧,٧	٥,٤	٧,٧	٧,٧
١٨	٠,٢٧	٠,٢٧	٠,٢٨	٠,٢٨	٠,١٧	١	١	١	١,٠٤	١,٠٤	٥,٨٨	٦,١	٦,١	٥,٨٨	٥,٨٨
١٩	٠,١٠	٠,١٠	٠,١١	٠,١١	٠,٠٤	١	١	١	١,١٠	١,١٠	٢٥	٢٧,٥	٢٧,٥	٢٥	٢٥
٢٠	٠,٧٦	٠,٧٦	٠,١٦	٠,١٦	٠,٠٨	١	١	١	٠,٢١	٠,٢١	١٢,٥	٢,٦	٢,٦	١٢,٥	١٢,٥
٢١	٠,٢٨	٠,٢٨	٠,١١	٠,١١	٠,٠٦	١	١	١	٠,٣٩	٠,٣٩	١٦,٧	٦,٦	٦,٥	١٦,٧	١٦,٧
٢٢	١,٧٧	١,٧٧	٠,٣٧	٠,٣٧	٠,١٧	١	١	١	٠,٢١	٠,٢١	٥,٨٨	١,٢	١,٢	٥,٨٨	٥,٨٨
٢٣	٠,٤٥	٠,٤٥	٠,٣٣	٠,٣٣	٠,١٩	١	١	١	٠,٧٣	٠,٧٣	٥,٢٦	٣,٩	٣,٩	٥,٣	٥,٣
٢٤	٠,٥٦	٠,٥٦	٠,٣٣	٠,٤٤	٠,٣٠	١	٠,٧٥	١,٣٣	٠,٥٩	٠,٧٩	٢,٥٠	٢,٦	١,٩٦	٣,٣٣	٣,٣٣
٢٥	٠,٢٩	٠,٢٩	٠,٧٢	٠,٧٢	٠,١٢	١	١	١	٢,٤٨	٢,٤٨	٨,٣٣	٢٠,٧	٢٠,٧	٨,٣٣	٨,٣٣
٢٦	٢,٢٥	٢,٢٥	٠,٣٤	٠,٣٤	٠,١٧	١	١	١	٠,١٥	٠,١٥	٥,٨٨	٠,٨٩	٠,٨٩	٥,٨٨	٥,٨٨
٢٧	٠,٩٩	٠,٩٩	٠,٧٠	٠,٧٠	٠,٣٠	١	١	١	٠,٧١	٠,٧١	٣,٣٣	٢,٣٦	٢,٤	٣,٣٣	٣,٣٣
٢٨	٠,٢٠	٠,٣٢	٠,٧٠	٠,٧٢	٠,٢٤	٠,٦٣	٠,٩٧	١,٠٣	٣,٥٠	٢,٢٥	٤,٠٥	٩,٣٨	١٤,٦	٢,٦	٦,٧
٢٩	٠,١٥	٠,١٧	٠,١٥	٠,١٥	٠,١٦	٠,٨٨	١	١	١	٠,٨٨	٦,٢٥	٥,٥	٦,٢٥	٥,٥	٧,١
٣٠	٠,١٥	٠,١٧	٠,٠٦	٠,١٤	٠,٠٩	٠,٨٨	٠,٤٣	٢,٣٣	٠,٤٠	٠,٨٢	٤,٧٦	٩,١٥	٤,٤٤	٩,٨	١٢,٦

المراجع

1. Athena, M., Owen. (2012) Tafoni Caves in Quaternary Carbonate eolianites: example from The Bahamas, p15.
2. Campbell, S.W., (1999) Chemical Weathering and associated with Tafoni at Papago Park, Central Arizona. Earth Surface Processes and Landforms 24, p. 271-278.
3. Embabi, N., (2004) The Geomorphology of Egypt: The Nile Valley and The Westren Desert, Egyptian Geographical Society, p 327.
4. Goudie, A.S, (2003) Encyclopedia of Geomorphology, London, Routledge, p. 1200.
5. Hacker, A., (2003) Controls of Tafoni Development in Castle Rocks, Idaho. Proceedings of the 16th Annual Keck Research Sumposium in Geology, Beloit Wisconsin.
6. Huinink, H.P., Pel, L., Kopinga, K., (2004) Simulating the Growth of Tafoni: Earth Surfaces Process and Landforms, v. 29, p. 1225-1233.
7. Martini, I. P., (1978) Tafoni Weathering, with Examples from Tuscany, Italy: Zeitschrift fuer Geomorphologie, v. 22, p. 44-67.
8. Matsukura, y. and Tanaka, Y., (2000) Effect of Rock Hardness and Moisture Content on Tafoni Weathering in the Granite of Mount Doeg-Sung, Korea. Geografiska Annaler Series A: Physical Geography, Blackwell Publishing Limited. 82 p.59-67.
9. McBride, E. F. and Picard, M. D., (2004) Origin of Honeycombs and Related Weathering Forms in Oligocene Macigno Sandstone, Tuscan Coast Near Livorno, Italy. Earth Surface Processes and Landforms 29, p. 713-735.
10. McBride, E.F., and Picard. M.D., (2000) Origin and Development of Tafoni in Tunnel Spring Tuff, Crystal Peak, Utah, USA Earth and Surface Processes and Landforms. 25, p.869-879.

11. Mellor, A., Short J. and Kirkby, S.J., (1997) Tafoni in the El Chorro Area, Andalucia, Southern Spain. Earth Surface Processes and Landforms, 22, p. 817-833.
12. Mottershead, D., Pye, K., (1994) Tafoni on coastal slopes, south Devon, UK. Earth Surface Processes and Landforms 19, p. 543-563.
13. Mustoe, G. E., 1982, Origin of Honeycomb Weathering: GSA Bulletin, v. 93, p. 108-115.
14. Neuendorf, K.K.E., Mehl, J.P., Jackson, J. A., (2005) Glossary of Geology, Fifth Edition, American Geological Institute. P.20, 305, 523, and 655.
15. Norwick, S.A., and Dexter, L.R., (2002) Rates of Development of Tafoni in the Moenkopi and Kaibab Formations in Meteor Crater and on the Colorado Plateau, Northeastern Arizona. Earth Surface Processes and Landforms 27, p. 11-26.
16. Rögner, K., (1988) Measurements of Cavernous Weathering a Semiquantitative Study. Geomorphic Processes in Environments with strong seasonal contrasts, Vol. I Hillslope Processes. P. 101-109.
17. Sunamura, T., 1996, A Physical Model for the Rate of Coastal Tafoni Development: The Journal of Geology, v. 104, p. 741-748.
18. Turkington, A. V., Phillips, J.D., (2004) Cavernous Weathering, Dynamical Instability and Self Organization: Earth Surface Processes and Landforms, v. 29, p. 665-675.
19. Turkington, A.V., (1998) Cavernous Weathering in Sandstone: Lessons to be learned from Natural Exposure. Quarterly Journal of Engineering Geology 31, p.375-383.
20. Twenhaile, A. S., 1992, Chapter 2 - Chemical and Salt Weathering, Geomorphology of Rock Coasts, Oxford, U.K., Oxford University Press, p. 31-58.
21. Viles, H. A., (2001) **Scale** Issues in **Weathering** Studies: **Geomorphology**, v. 41, p. 63-72.