جامعة البعث
كلية العلوم

50
10

سكن كلية العلوم

قسم الجيولوجيا
السنة الأولى

مركز العلوم للخدمات الجامعية
معادن - صخور - خرائط

جيولوجيا فيزيائية (2)

نظري

المحاضرة الثالثة

الفصل الثاني

للعام الدراسي 2017 2018

د. سعيد ابراهيم

مركز العلوم للخدمات الجامعية
معادن - صخور - خرائط
مركز العلوم للخدمات الجامعية
معادن - صخور - خرائط

الفعل الجيولوجي للمياه الجوفية

تعتبر المياه من أكثر المواد انتشاراً في الطبيعة. وتتواجد المياه على سطح الأرض في المحيطات والبحار والبحيرات والأنهار. أما المياه الموجودة تحت سطح الأرض فتسمى المياه الجوفية، حيث يمكن أن تتواجد هذه المياه على أعماق مختلفة وفي تشكيلات جيولوجية مختلفة.

ويسمى العلم الذي يدرس منشأ هذه المياه وشروط تجمعها وتوضعها وخواصها الفيزيائية والكيميائية وحركتها ونظامها وطرائق استثمارها وادارتها بعلم المياه الجوفية أو الهيدروجيولوجيا.

تلعب المياه الجوفية دوراً مهماً في تطور القشرة الأرضية، فانتشارها الواسع وحركتها يقودان إلى تأثير متبادل مع الصخور وبالتالي إعادة توزع وانتشار هذه المواد في القشرة الأرضية. كذلك تساهم في عمليتي الأكسدة والإرجاع وغيرها من العمليات. وبشكل عام فان الفعل الجيولوجي للمياه الجوفية يتلخص بما يلي:

1. التأثير الكيميائي المتبادل مع الصخور والذي يؤدي إلى الانحلال الكارستي لهذه الصخور وتشكل المظاهر الكارستية السطحية والتحت سطحية المختلفة.
2. نقل المواد المنحلة واعادة توضعها.
3. الانهيارات والانزلاقات الأرضية (أو ما يسمى فعل النقل الكتلي وحركة الأنقاض).

1- الانهيارات والانزلاقات وحركة الأنقاض

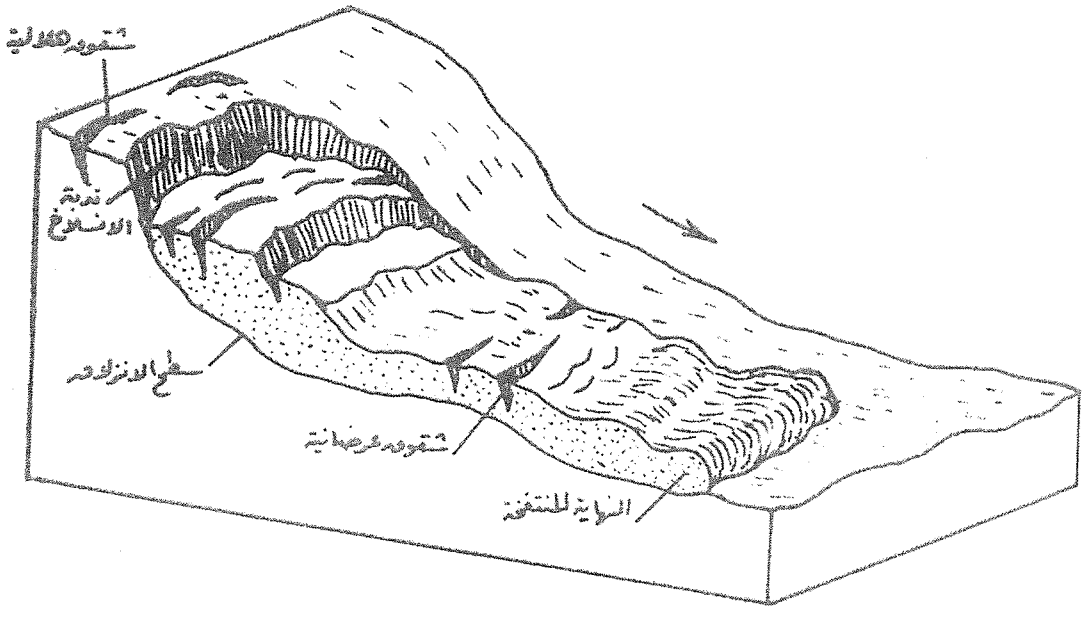
تعمل عمليات الحت والتعرية على خفض وتسوية التضاريس على كافة السطوح والمنحدرات ذات الانحدار الضعيف وحتى الشديد، دون أن تستعين بالعوامل المحركة للمواد (مثل المياه الجارية والرياح والجليد). أما على السطوح الأفقية فتبقى نواتج التجوية في مكانها دون انتقال إذا لم تتدخل المياه الجارية أو الرياح أو أي عامل محرك آخر.

وتتعلق سرعة حدوث هذه العمليات بالعوامل التالية:

1. قوانين الجاذبية الأرضية وشدة القوة الكابحة المعاكسة لحركة السقوط، فقوة الثقالة هي القوة الأساسية المحركة للكتل الصخرية.
2. درجة انحدار السطوح، فالسطوح ذات الانحدار الشديد تتأثر بهذه العمليات بشكل أسرع من السطوح القليلة الانحدار.
3. نسبة دخول الماء ضمن الصخور والتربة، حيث تزيد المياه من وزن وحجم هذه الصخور وتنقص قوى التماسك الداخلية بين مكوناتها. مما يسبب ويساعد على حدوث الانهيارات والانزلاقات الأرضية.
4. نوع الصخور وبنيتها، ويلعب ذلك دوراً هاماً في تنشيط أو عرقلة أعمال التعرية.

هذا ويمكن بناء على نوع المواد المتحركة، وشكل الحركة، وآليتها تمييز وجود الأنماط التالية من هذه العمليات:

1. الانهيارات: وهي احد أشكال حركة الأنقاض السريعة التي تحدث على السفوح والمنحدرات الشديدة والجروف الصخرية القائمة. أي على السطوح التي يتراوح انحدارها بين 45 - 90 درجة. وتتم هذه الحركة عادة بسرعة كبيرة ومفاجئة يمكن أن تزيد على 200 كم/سا. ويمكن حسب نوع المواد المتحركة التمييز بين الانهيارات الصخرية حيث تتكون المواد المنهارة من كتل وجلاميد صخرية كبيرة. والانهيارات الصخرية – الترابية، والتي تتألف من خليط قطع الصخور والحجارة الصغيرة نسبياً مع مواد ناعمة وفتات حجري مكسر. ويعتمد حدوث هذه الانهيارات على درجة الانحدار وعلى وجود الشقوق والفواصل الصخرية، والتي تزيد التجوية الفيزيائية بشكل خاص من فعاليتها ودورها في تفكيك الصخور وإضعاف تماسكها. وتتشكل نتيجة هذه العملية في أسفل السفوح والمنحدرات أكداس من الصخور والجلاميد على شكل مخاريط من الأنقاض التي تعمل المجاري المائية على نقلها وإزالتها. وهكذا تتراجع الأجزاء العليا من التضاريس وتخسر جزء من سفوحها وجوانبها.
2. الانزلاقات الأرضية: تحدث عمليات الانزلاق عادة على المنحدرات التي يكون فيها ميل الطبقات الصخرية متفقاً مع الانحدار الطبوغرافي مع وجود مواد طرية قابلة للتبلل بالماء المتسرب إليها (مثل المواد الغضارية) وعند الوصول إلى حالة عدم التوازن بين الصخور المرتكزة على القاعدة المزلقة وبين الجاذبية الأرضية نتيجة الأمطار والمياه الكثيرة، فان المواد المنزلقة تتحرك على سطح الانزلاق على شكل كتلة كبيرة واحدة لها مظهر لسان متطاول باتجاه المنطقة المنخفضة الضعيفة الانحدار والتي تستقر عليها المواد المنزلقة (شكل 2). ولما كانت الانزلاقات من حوادث حركة الأنقاض السريعة والواسعة الانتشار في العالم فإنها تشكل خطراً على الإنسان ومؤسساته العمرانية والاقتصادية.



شكل 2: يمثل الانزلاق الأرضي وعناصره المختلفة.

3. الزحف: وهو حركة بطيئة ومستمرة على المنحدرات للتربة والحطام الصخري الغير متماسك، ويتميز بمعدل حركة عادة أقل من 1 سم في السنة. وهذه الحركة يمكن أن تحدث على طول المنحدرات والسفوح القليلة الانحدار والشبه أفقية حيث تؤثر آلية الحركة والزحف في جميع مواد غطاء الأنقاض على شكل حركة شاملة لكل المواد المفككة. وهذه الحركة قد لا تعرف إلا من خلال المظاهر التي ترافقها مثل ميل الأشجار والأعمدة وأسوار المزارع باتجاه الحركة الهابطة. وهو يختلف عن الانزلاق بكونه يحدث على امتداد المنحدرات الواقعة عملياً دون درجة انحدار 27. ويسهم في الزحف عاملان أساسيان هما الماء في التربة، والدورات اليومية للتجمد والذوبان.
4. السيلان: تحدث عمليات السيلان في المواد الحطامية الناعمة والتربة المشبعة بالمياه حيث يمكن أن تصل نسبة المياه إلى 50 % من حجم الكتلة المتحركة من الأنقاض والتربة. وهذه الحركة يمكن أن تشمل سطوحاً واسعة أو أن تنحصر على امتداد منخفض له شكل الوادي. ويمكن في هذه الحالة التمييز بين وجود سيلان ترابي وسيلان وحلي. وعلى العموم فان السيول الترابية أسرع في حركتها من أشكال الزحف المختلفة.

أما السيلان الوحلي (أو الجريان الطيني) فهو حالة خاصة من حوادث السيلان تغلب فيه المواد الناعمة من تربة ورمال، ويتمتع بدرجة عالية من السيولة أثناء الحركة نتيجة بنية المواد وارتفاع نسبة المواد المشبعة بها والتي قد تصل إلى 60 % من حجم المواد المتحركة. وهي تمثل مرحلة انتقالية بين الجريان النهري من جهة وبين السيلان الترابي من جهة ثانية. وينشأ السيلان الوحلي نتيجة وجود مواد ترابية ناعمة متوضعة على سفوح شديدة أو واضحة الانحدار تتعرض لأمطار غزيرة ومفاجئة بعد فترة طويلة من الجفاف، وذلك في منطقة فقيرة أو عديمة الغطاء النباتي. وتتوفر مثل هذه الظروف عادة في على أطراف الجبال والمرتفعات في المناطق الجافة والصحراوية. كما قد تؤدي الأمطار الغزيرة التي تحدث فوق الرماد والرمال البركانية إلى حدوث سيلان على السفوح والأراضي المجاورة مسبباً الكثير من الحوادث.

2- التأثير الكيميائي للمياه على الصخور (الكارست)

أشرنا سابقاً إلى أهمية عملية انحلال الصخور ضمن عمليات التجوية الكيميائية، وهذه العملية تؤدي إلى تشكل وتطور أشكال فريدة وخاصة في الصخور يطلق عليها اسم الكارست.

عملية الكارست وشروط حدوثها

عملية الكارست هي عملية انحلال وذوبان الصخور بتأثير المياه السطحية والجوفية، ونقل نواتج هذا الانحلال من مواد ذائبة وعالقة في المحاليل الناتجة عن هذه العملية. مما يؤدي لتشكل فراغات وفجوات وتكهفات في هذه الصخور.

فعمليات الكارست تشمل كل عمليات الانحلال التي تحدث على سطح الأرض وفي باطنها، وتحول المياه السطحية إلى مجاري مائية تحت سطحية. ويمكن من خلال التعريف السابق ملاحظة أن عمليات الانحلال الكارستي يمكن أن تحدث في كافة أنواع الصخور القابلة لانحلال والذوبان (أي الصخور المؤلفة من مواد قابلة للتشرد والانحلال بالماء). وبالتالي فان عملية الانحلال الكارستي يمكن أن تحدث في الأنواع التالية من الصخور:

- الصخور الملحية: وهي الصخور المؤلفة من فلز الهاليت (الملح الصخري NaCl)، ويسمى الكارست الملحي.
- الصخور الجصية: وهي الصخور المؤلفة من فلز الجص $Ca[SO_4].2H_2O$، أو الأنهدريت $Ca[SO_4]$، ويسمى الكارست الجصي.
- الصخور الكربوناتية: وهي الصخور التي يدخل في تركيبها الجذر الكيميائي للكربونات $[CO_3]^{++}$، مثل الصخور الكلسية والدولوميتية*، ويسمى الكارست الكربوناتي.

إن النوعين الأول والثاني من الكارست (الملحي والجصي) قليلي الأهمية، وذلك نظراً لقلة انتشار وتواجد هذه الأنواع من الصخور في الطبيعة. أما الصخور الكربوناتية فهي واسعة الانتشار وبالتالي أصبح مفهوم الكارست يستخدم بشكل رئيسي لتعبير عن الكارست الكربوناتي. كما أن الصخور الدولوميتية أقل تأثراً بالانحلال وعمليات الكارست من الصخور الكلسية، لذلك يستخدم مفهوم الصخور الكلسية بشكل واسع عند دراسة الكارست ومظاهره المختلفة.

ولقد اشتقت كلمة كارست (Karst) من اسم هضبة (Karios) وهي هضبة كلسية تقع في جنوب يوغسلافيا على البحر الادرياتيكي. حيث يوجد هناك تركيز واضح لهذه الظواهر، وحيث درست هذه المظاهر هناك لأول مرة.

تتم عملية الكارست في الصخور الكلسية المؤلفة من فلز الكالسيت $Ca[CO_3]$، بتأثير المياه المحملة بغاز ثاني أوكسيد الكربون المنحل فيها (مياه الأمطار) وذلك وفق التفاعل التالي:

$$Ca[CO_3] + H_2O + CO_2 \longrightarrow Ca[HCO_3]$$

أي يتشكل نتيجة التفاعل السابق مركب بيكربونات الكالسيوم $Ca[HCO_3]$، وهو مركب قابل للانحلال بالماء، أي يتواجد في المياه بشكل شوارد منحلة (Ca^{++}) و (HCO_3^{--})[1]. وتتعلق عملية الانحلال الكارستي للصخور بمجموعة من العوامل أهمها:

1. نوعية الصخور: فلقد لوحظ أن أكثر الصخور قابلية للانحلال هي الصخور الملحية (الهاليت NaCl)، تأتي بعدها الصخور الجصية $Ca[SO_4].2H_2O$، بينما يكون انحلال الصخور الكلسية أكثر صعوبة[2].

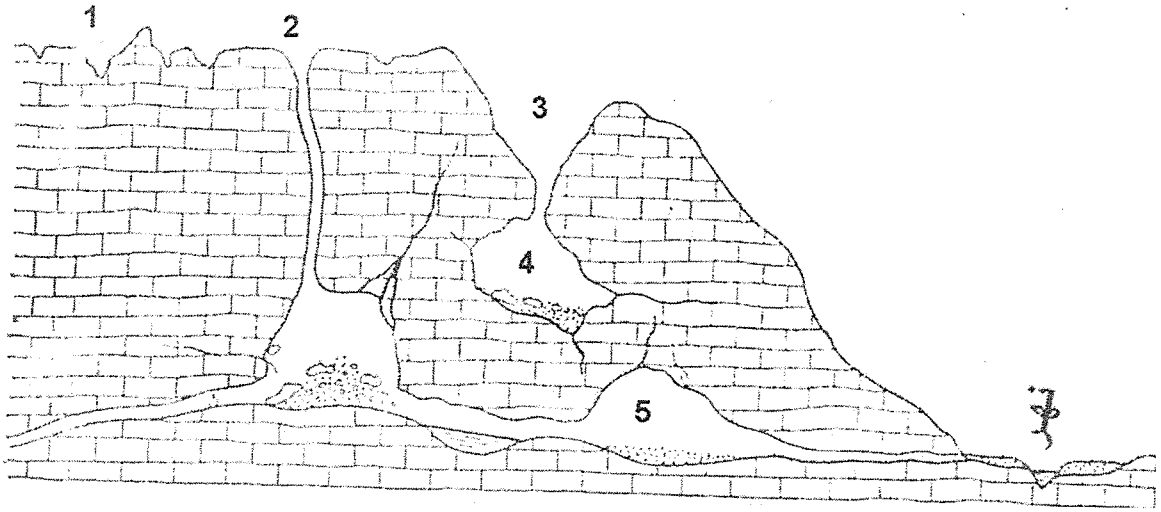
---

* تتألف الصخور الكلسية من فلز الكالسيت $Ca[CO_3]$، والدولوميتية من فلز الدولوميت $(Ca,Mg)[CO_3]_2$)، ويتشكل الدولوميت عادة نتيجة استبدال شوارد Ca^{++} في فلز الكالسيت بشوارد Mg^{++} وتسمى هذه العملية بالدلمتة.

[1] تشكل هذه الشوارد المنحلة ما يسمى القساوة المؤقتة للمياه، والتي يمكن التخلص منها بترسيبها وذلك بتسخين المياه حتى الغليان فتتحول شوارد البيكربونات إلى شوارد غير منحلة تترسب على جدران الأوعية المنزلية وتسبب تكلسها.

2. درجة الحرارة: وهي تلعب دوراً مهماً في عملية الانحلال، فلقد بينت التجارب أن ارتفاع الحرارة يزيد من انحلال الصخور الكلسية[3]. لذلك نلاحظ أن الأشكال الكارستية تكون متطورة في المناطق المدارية.
3. عرض الشقوق: فلقد تبين أن الانحلال الكارستي لا ينشط إلا عندما يكون عرض الشق أكبر من 1 مم. وهذا ما يفسر ندرة المظاهر الكارستية في الصخور الحوارية اللينة التي لا تحوي عادة شقوق وفواصل مثل الصخور الكلسية القاسية[4].
4. توفر مناخ ذي أمطار متوسطة حتى غزيرة، وكذلك نسبة انحلال ثاني أوكسيد الكربون في هذه المياه، وذلك لأن ارتفاع هذه النسبة يزيد حوالي عشرة أضعاف سرعة التحلل الكارستي.
5. التاريخ الجيولوجي للمنطقة: فلقد تبين أن وجود وديان متعمقة بجانب المناطق المرتفعة التي ترتكز عليها صخور قابلة للانحلال ذات فواصل كثيرة يزيد من سرعة التحلل الكارستي لهذه الصخور بسبب تدفق المياه نحو الأسفل عبر هذه الفواصل. فحركة الماء نحو الأسفل تعطيه القدرة على العمل الكارستي بينما المياه الراكدة لا تستطيع القيام بذلك.

وهكذا تتشكل في المناطق التي تتوفر فيها الشروط الطبيعية المذكورة أعلاه مظاهر تضاريسية كارستية مختلفة من حيث الشكل والموقع، يمكن فيها التمييز بشكل رئيسي بين الأشكال الكارستية السطحية (أو الكارست المكشوف)، والأشكال الكارستية الباطنية (أو التحت سطحية) وذلك كما في الشكل (3):



1- خدوش وأفاريز. 2- بئر كارستي. 3- قمع كارستي (جوبة). 4- كهف كارستي. 5- مغاور وممرات.

شكل رقم (3) يوضح أهم المظاهر الكارستية السطحية والجوفية.

1- المظاهر الكارستية السطحية

---

[2] بينت التجارب أن انحلال جزيء واحد من الملح يتطلب 3 جزيئات ماء، وانحلال جزيء من الجص يتطلب 480 جزيء ماء. بينما انحلال جزيء من الكالسيت يتطلب حوالي 1000 - 3000 جزيء ماء.

[3] تبين أنه في درجة الحرارة 25 ينحل الكالسيت بمقدار 14.23 ملغ/لتر. وفي الدرجة 50 ينحل بمقدار 17 ملغ/لتر. وفي درجة الحرارة 100 ينحل بمقدار 17.79 ملغ/لتر.

[4] يجب الانتباه أن النفوذية للصخر من خلال المسامات مثل الصخور الحوارية لا تساهم في تشكل الكارست، وذلك لأن المياه سوف ترتشح من خلال جسم الصخر بالكامل ولن تتركز الحركة على طول خطوط محددة كما في حالة الشقوق.

تتطور هذه المظاهر والأشكال الكارستية السطحية نتيجة عمليات انحلال الصخور والطبقات الصخرية الكلسية المكشوفة على سطح الأرض. وهي تتجلى بمجمعة من المظاهر والأشكال مثل الخدوش والأفاريز على سطح الصخور، والآبار والخفوس الكارستية (أو الدحول)، وحفر الانحلال والانهيار الكارستي (أو الدولينات) وهي تسمى محلياً الجوبات والهوات (مفردها هوة)، والحقول الكارستية (أو الدارات)، وأبراج الكارست (أو التلال الشاهدة). وهذه الأشكال تدرس عادة بالتفصيل في مقرر الجيومورفولوجيا.

2- الأشكال الكارستية التحت سطحية (الكارست المغطى)

تتشكل هذه المظاهر نتيجة تسرب المياه السطحية عبر الشقوق وفتحات الابتلاع وغيرها من مظاهر الكارست السطحي إلى داخل الصخور، مما يؤدي لتشكل الأشكال الكارستية التالية:

آ- **شبكة المياه الكارستية التحت سطحية:** يتم ابتلاع المياه السطحية في مناطق الكارست عبر مجموعة من الشقوق والأقنية والمسالك المائية التي تشكل شبكة تصريف المياه الكارستية تحت سطح الأرض. فالصخور الكلسية تكون عادة مشققة بسبب قساوتها بشبكة متقاطعة من الشقوق التكتونية وذلك نتيجة لتعرض هذه الصخور الكلسية لقوى ضغط والتواء مختلفة. وتصبح هذه الشقوق فيما بعد قنوات وخطوط مائية تعمل المياه على توسيعها باستمرار عن طريق عملية التحلل الكارستي لتصبح تستوعب كميات أكبر من المياه. وقد يكون هناك أحياناً ارتباط بين الشبكات المائية في الصخور المتجاورة، أو قد تكون عبارة عن مجموعة من الشبكات المنفصلة عن بعضها. ويمكن القول أن هذه الشبكة مؤلفة من عدد لا يحصى من الأنابيب المتشعبة التي تشكل نسيجاً معقداً يمكن تشبيهه بما يسمى الوعاء الكارستي. حيث تكثر الأنابيب في هذا الوعاء نحو السطح وتكون ضيقة القطر (وهي تشكل الدحول). في حين تأخذ هذه الأنابيب بالتوسع والالتحام (وخاصة المتجاورة منها) لتتحد مشكلتاً أنابيب أكبر وأقل عدداً باتجاه الأسفل (شجرة الكارست). تتحرك المياه السطحية المتدفقة من حفر ابتلاع وحفر غائرة عبر شبكة هذه الأنابيب والشقوق نحو الأسفل حتى تصبح على تماس مع طبقة كتيمة، حيث تتجه بعد ذلك حسب ميل الطبقة لتظهر عند نهايتها على جوانب الوادي وتسمى هذه الينابيع بالينابيع الكارستية. ويمكن تقسيم هذه الينابيع الكارستية إلى نوعين رئيسيين هما:

- النوع الأول: تتدفق أو تسيل مياهه تحت تأثير الجاذبية من أحد جوانب الوادي على أرض منبسطة. وهو من أكثر الينابيع الكارستية انتشاراً.
- أما النوع الثاني فتخرج منه المياه عبر أقنية صخرية عميقة على شكل نافورة نتيجة للضغط المائي الكبير، والذي يحدث نتيجة امتلاء الأوعية الكارستية بالمياه. حيث تفوق في هذه الحالة كمية المياه الطاقة الاستيعابية لهذه الأقنية على التصريف. ومن أمثلة هذا الينابيع نبع عين الفيجة ونبع الغمقا قرب صافيتا. أما أحد أكبر الينابيع الكارستية العادية في العالم فيعتبر نبع رأس العين الذي يشكل نهر الخابور في سوريا والذي تصل غزارته إلى 36 – 40 م^3/ثا.

ب- **المغاور والكهوف الكارستية والمظاهر التي تصاحبها:** المغاور هي ممرات وفراغات بسيطة أو متشعبة تحت سطح الأرض تكون مملوءة بالماء أو خالية منه. وتتصل هذه الفراغات بسطح الأرض بواسطة أقنية

وشقوق شبكة المياه الكارستية الضمنية. وهذه الممرات تمتد عادة باتجاهات أفقية، وفي بعض الأحيان بشكل ممرات شاقولية وذلك عبر عدة مستويات متعاقبة للممرات الأفقية والشاقولية مما يؤدي لتشكل ما يسمى المغارات الرواقية.

تتشكل المغاور الكارستية في طبقات الصخور الكلسية القليلة الميل، وخاصة في مناطق وجود التربة الدبالية التي ترفع نسبة وجود غاز ثاني أوكسيد الكربون في المياه المتسربة نحو الأسفل بشكل كبير (أعلى 300 مرة من نسبة هذا الغاز في الجو). وذلك لأن تفاعلات انحلال الصخور الكلسية تؤدي إلى تناقص نسبة هذا الغاز المنحل في المياه مع الأعماق، مما يبطئ كثيراً من سرعة التحلل كلما انخفضنا نحو الأسفل. وتدل الملاحظات الحقلية أن كل الممرات المتفرعة والمتشعبة للمغاور الكارستية الكبيرة منها والصغيرة، هي في الأصل شقوق وفواصل وسطوح تطبق سمحت للمياه بالمرور خلالها، فقامت هذه المياه بتوسيعها تدريجياً بالتحلل أو بالحت الميكانيكي الناتج عن الحركة حتى أصبحت ممرات واسعة تتسرب المياه على جدرانها أو تستقر على أرضها ضمن حفر مختلفة الأشكال. أما الأنهار الضمنية التي تجري في بعض هذه المغاور فتعتبر مظهراً متأخراً من تطور هذه المغاور.

أما الكهوف الكارستية الصغيرة فهي تبين بشكل واضح كيف أن تكونها قد حدث على طول خطوط تتحكم فيها الفواصل والشقوق وسطوح التطبق إلى حد كبير. وكيف توسعت هذه الفواصل والشقوق بفعل انحلال تمايزي قامت به المياه التي جرت فيها. وتختلف الكهوف الكارستية اختلافاً كبيراً من حيث حجمها وشكلها واتصالها مع بعضها أو استقلالها[1]. ولقد درس العالم **مالتون** مراحل تشكل المغاور الكارستية وتوصل نتيجة ذلك إلى الأفكار التالية:

1. تتشكل المغاور الكارستية بشكل رئيسي فوق مستوى الماء الباطني وذلك بواسطة عمل المياه السطحية المتسربة نحو الأسفل.
2. إن دورة التشكل قد تمتد دون مستوى المياه الباطنية، ولكن ذلك لا يعني بأن لها أهمية في تشكل المغارة.
3. تتحكم مستويات القاعدة المحلية للأنهار السطحية في عمق المغارة.
4. يلعب اتجاه الشقوق وسطوح التطبق دوراً كبيراً في تحديد اتجاهات امتداد المغارة.
5. يساهم الحت الميكانيكي بشكل كبير في كبر حجم المغارة.
6. يمكن لمستوى المغارة أن يهبط إلى مستوى أخفض بالقدر الذي يسمح به الحت الشاقولي للوديان السطحية وهذا ما يساعد على تكون عدة مستويات للمغارة.
7. بمقدار تطور المغارة يصبح تكون رواسب الكهوف الكارستية عملية سائدة.

---

[1] يعتبر كهف الماموث في الولايات المتحدة من أكبر الكهوف الكارستية في العالم حيث يبلغ الطول الإجمالي لمغاوره وممراته حوالي 160 كم. يليه الكهف الثاني من حيث الحجم الكهف البوتاسي في ولاية انديانا، أما في روسيا فيعتبر كهف الكونغور من أضخم الكهوف حيث يتألف من 85 مغارة، بطول حوالي 4.6 كم، وهو يحوي حوالي 360 بحيرة. أما في سوريا فيمكن اعتبار مغارة جوعيت (في منطقة الشيخ بدر) من أكبر الكهوف الكارستية حيث تمتد لمسافة حوالي 1800 متر تحت الأرض.

هذا ولقد توصلت الباحثة الروسية (**كالودياجنايا**) نتيجة دراستها للكارست إلى قاعدة مهمة أيضاً وهي [أن الكهوف والتجاويف الكارستية تتطور بشكل كبير جداً في أماكن تماس الصخور الكلسية (الكارستية) مع الصخور الغير كارستية (الغير قابلة للتحلل الكارستي) مثل الصخور الحوارية والغضارية الكتيمة].

إن هذه القاعدة تعني وجود طبقة كلسية سميكة في الأعلى قابلة للانحلال الكارستي، تتوضع فوق طبقات صخرية كتيمة تمنع المياه من الاستمرار في التسرب نحو الأسفل، وتحول الحركة الشاقولية للمياه المتسربة من الأعلى إلى حركة أفقية فوق هذه الصخور الكتيمة فتتشكل أنهار جوفية تسير وفق محاور معينة وتحفر وتحلل لنفسها مجاري بشكل مغاور وممرات كارستية أفقية داخل الطبقات الكلسية تمتد لمسافات مختلفة.

أما المظاهر أو الأشكال المرافقة للمغاور الكارستية فتتمثل بالصواعد والنوازل والأعمدة والستائر الجدرية أو المعلقة في السقف. حيث يمكن تفسير أسباب تشكل هذه المظاهر بتغير ظروف تشكل الكارست مع الأعماق. وتوقف عملية الانحلال الكارستي والانتقال إلى مرحلة الترسيب الكارستي.

ج- **عملية الترسيب الكارستي:** تستمر المياه المتسربة عبر الصخور نحوا الأسفل بعملية التفاعل والانحلال طالما هناك كميات من غاز ثاني أوكسيد الكربون كافية لحدوث الانحلال. وبالتالي فان هذه المياه تغتني بشوارد كربونات الكالسيوم المنحلة وتتناقص فيها كمية الغاز المنحل مع الأعماق حتى تنعدم. وعند ذلك تتوقف عملية الانحلال الكارستي. ونظراً لتغير درجات الحرارة مع الأعماق، حيث تصبح درجة حرارة الهواء داخل الممرات الكارستية أقل من درجة حرارة المياه المتسربة. وعند ذلك تنخفض الانحلالية ويتغير اتجاه تفاعل الانحلال الكارستي الذي شاهدناه سابقاً ليأخذ اتجاه معاكس وتأخذ المواد الكلسية بالترسب (تفاعل عكوس). ويتم ذلك وفق التفاعل التالي:

$$Ca[HCO_3] \longrightarrow Ca[CO_3] + H_2O + CO_2$$

ويتشكل نتيجة هذا التفاعل فلز الكالسيت (أو الأراغونيت[2]) الذي يتوضع ويلتصق على سطح الصخور والتجاويف. ليشكل المظاهر والأشكال الكارستية المذكورة سابقاً والتي هي:

1. **النوازل** (Stalactites): وتسمى أحياناً المقرنصات. وهي عبارة عن أشكالاً مدلات من سقف المغارة نحو أرضها، تبدو بشكل أعمدة مدورة شاقولية تستدق باتجاه الأسفل. وهي تكون عادة ذات قناة مركزية داخلية قطرها حوالي 5 مم بحيث تتسع لقطرة الماء التي تتسرب عبرها لتسقط في النهاية على قاع المغارة، كما تشاهد أحياناً مياه تسيل على هذه النوازل من الخارج. وهذه المياه المتسربة من السقف نحو الأسفل توضع الكالسيت باستمرار وتقوم بعملية نمو لهذه الأجسام. فالمياه المتسربة عبر القناة المركزية تزيد من طول هذه النوازل، أما المياه المتسربة عليها من الخارج فتزيد من قطرها حيث توضع باستمرار

---

[2] فلز الأراغونيت هو أيضاً يتألف مثل الكالسيت من $Ca[CO_3]$، ولكنه يختلف عنه في المنظومة البلورية. فالكالسيت يتبلور وفق المنظومة المثلثية أما الأراغونيت فيتبلور وفق المنظومة المعينية القائمة وهو ما يعطيه خواص مميزة عن الكالسيت.

طبقات رقيقة من الكلس فوق بعضها، مما يعطي المقطع العرضي لهذه النوازل شكل حلقات متعاقبة تشبه حلقات النمو التي تشاهد في المقطع العرضي لجذوع الأشجار.

2. **الصواعد** (Stalagmite): هي أعمدة مشابهة ومعاكسة للنوازل، ترتفع من أرض المغارة نحو سقفها باستقامة وباتجاه مصدر النقاط المائية الساقطة من السقف. ويختلف شكلها بين صواعد رفيعة وأخرى غليظة عريضة القاعدة. وطبيعي أن تكون الصواعد خالية من القناة المركزية التي نجدها في النوازل. لأن الصواعد تتشكل من تبخر قطرات الماء المتساقطة كما أشرنا من سقف المغارة، لتترك هذه القطرات خلفها الكالسيت المتكدس باستمرار ليشكل الصواعد.
3. **الأعمدة** (Columns): وهي تتشكل نتيجة النمو المستمر والمتقابل للصواعد والنوازل. فمع مرور الزمن تتصل هذه الأشكال مع بعضها وتتحد عبر رؤوسها في البداية. ومع استمرار تدفق المياه عليها من الخارج تستمر بالنمو لتشكل أعمدة متصلة تمتد بين سقف المغارة وأرضها. ويتوقف حجم هذه الأعمدة على الزمن، حيث تصبح مع مرور الوقت ضخمة وذات أقطار كبيرة.
4. **الستائر** (أو السجف): هي ترسبات كلسية تتشكل إذا سالت المياه من سقف المغارة نحو الأسفل عبر سطح مائل أو شاقولي. حيث يتوضع الكالسيت على طول خط سيلان المياه الذي يكون متعرجاً. ومن خط الكالسيت هذا تتدلى رقائق من الصخر المؤلف من الكالسيت على شكل ستائر ملساء لامعة.

ومن الجدير بالذكر أن كل المظاهر السابقة من صواعد ونوازل وغيرها يمكن أن تتشكل فقط في الممرات والفراغات الكارستية المملوءة بالهواء، أما في الممرات الكارستية المملوءة بالمياه التي تتدفق بداخلها فلا يلاحظ على جدرانها وجود أي أثر لهذه الرسوبات الكارستية.

ومن المظاهر التي يمكن أن تترافق مع وجود المغاور الكارستية هي **الأنفاق والجسور الطبيعية**، حيث يؤدي تطور الكارست إلى وصول سقف بعض المغارات لحالة عدم التوازن والانهيار. وعند ذلك تتشكل ما يسمى نوافذ الكارست (Karest wndows) التي تنتهي من الأسفل بممرات وأنفاق أفقية وخاصة أذا كانت المجاري المائية ضمن هذه الأنفاق جافة نتيجة عملية الأسر الباطني للمجاري المائية. ويؤدي الانهيار المستمر لسقف نفق طبيعي إلى تناقص طوله حتى يصبح بشكل جسر طبيعي (أو جسر الكارست) مثل الجسر الطبيعي في فرجينيا الذي يبلغ ارتفاعه حوالي 100 قدم. وكذلك النفق الطبيعي في قرية بمحصر (منطقة الدريكيش).

يؤدي توضع شوارد المواد المنحلة بالماء إلى توضعها بشكل مواد فلزية تملأ الفراغات والشقوق الموجودة في الصخور. مما يجعل هذه الصخور أكثر تماسكاً، إذ تتحول الرمال المفككة إلى أحجار رملية والحصى إلى صخور الكونغلوميرا. بينما المحاليل المشبعة بالحديد والسيليس تعطي صخور حديدية أو سيليسية. كذلك تتشكل عروق فلزية نتيجة ملء الشقوق الصخرية بالموادالتي كانت منحلة بالمياه مما يساهم في تماسك هذه الصخور من جديد ويعطيها منظراً جمالياً يسمح باستخدامها في تجميل جدران الأبنية.