محاضرات مقرر جيوكيمياء النفط والمادة العضوية

د. أحلام إبراهيم

الفصل الأوّل: جيوكيمياء الكربون

إنتاج المادة العضوية وتراكمها – دورة الكربون العضوي

مقدمة: تتعلّق الجيوكيمياء العضوية، بمفهومها الواسع، بنسبة توفّر الكربون، باختلاف صيغه الكيميائية، في منظومة الكرة الأرضية. إنّ الكربون الموجود في ثنائي أكسيد الكربون CO_2 (والذي يمثّل الصيغة الكليّة غير العضوية للكربون) يتحوّل بسهولة بعملية التمثيل الضوئي إلى مواد للحياة، وهي المركّبات العضوية، كما أنّه يوجد في تركيب الأجزاء الرخوة لكلّ الأحياء والمتعضيّات، ولذلك يُعدّ من أهمّ العناصر عند تناول الجيوكيمياء العضوية.

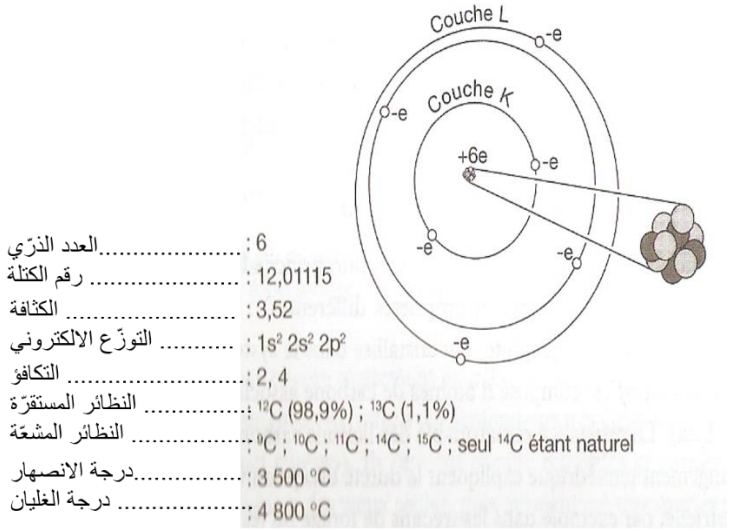
يمكن أن تكون المركبات العضوية مندمجة في الصخور الرسوبية ومحفوظة لملايين السنين، ولكنها في النهاية تعود إلى سطح الأرض، إمّا بوساطة العمليات الطبيعية أو بفعل الإنسان، حيث يمكن لها أن تترسب مرة ثانية في أنظمة حيوية. تشمل هذه الدورة مختلف التحولات البيوكيميائية والجيوكيميائية، ولفهم هذه التحولات وأنماط المركّبات العضوية المرتبطة بها، يجب أولاً أن نأخذ بعين الاعتبار أصل دور وأهمية ذرة الكربون فيها.

1 – 1–مواصفات ذرة الكربون:

يعدّ الكربون من أهم العناصر الداخلة في تركيب المادة الحية والمادة العضوية وجميع المركّبات الناتجة عن تطوراتها اللاحقة، فهو يدخل في تكوين الهيكل الكربوني لكلّ المركبات الحيوية مثل الغلوكوز *(Glucose)*، التريوز *(Triose)*، البنتوز *(Pentose)*، اللاكتوز *(Lactose)*، النشاء *(Starch)*، الغليكوجين *(Glycogen)*، السيللوز *(Cellulose)* وآلاف مركبات الكربوهيدرات الأخرى بل ملايينها. إنّه المكوّن الأساسي للدهون والشموع والحموض الأمينية، وهو مكون أساسي ورئيس في الخشب والفحم والبترول والحموض النووية *(Nucleic acids)* ومركبات الطاقة.

يقع الكربون في الفصيلة الرابعة من الجدول الدوري (اللامعادن)، أي أن ذرته تحتوي على أربعة إلكترونات في مدارها الخارجي (الشكل 1–1)، أي هو رباعي التكافؤ، في موقع وسط بين الكهرجابية والكهرسلبية، لذلك لا يسعى للتخلي عن الإلكترونات أو اكتسابها بل يميل إلى مشاركتها لتشكيل روابط مشتركة مع ذرات كربون أخرى أو مع غيرها من العناصر.

قد يشارك الكربون بزوج واحد من الإلكترونات فيشكّل رابطة مشتركة مفردة، وقد يشارك بزوجين أو أكثر من الإلكترونات مع الذرّات الأخرى فيشكّل روابط مشتركة متعدّدة، هذا ما ينتج عنه تركيبات مختلفة للمركبّات العضويّة. يمكن للكربون أن يرتبط بسرعة مع الهيدروجين، أو أن يتأكسد بسرعة باتحاده مع الأكسجين، ليشكّل أكثر مركّبين للكربون شيوعاً في الطبيعة، وهما CH_4 وCO_2.



الشكل 1-1: خصائص ومواصفات ذرة الكربون.

تعتبر قدرة الكربون على الاتحاد مع نفسه ليشكّل سلاسل، حلقات، معقّدات، وجسور كربونيّة قويّة، من أهم الميّزات، التي تجعله العنصر الأساسي لكلّ أشكال الحياة، ولا يستطيع أيّ من العناصر الأخرى المعروفة في الطبيعة أن يقوم بمثل هذا الدور إلّا السيليكون، الذي يتميّز أيضاً برابطة تكافؤية رباعيّة.

يستطيع الكربون باتحاده مع نفسه ومع العناصر الأخرى تشكيل ما يقارب أربعة ملايين مركّباً عضويّاً، بينما تشكّل كلّ العناصر الأخرى المعروفة حوالي سبعين ألفاً من المركبات غير العضويّة.

يوجد في الطبيعة ثلاثة نظائر للكربون C^{12} ، C^{13}، C^{14}. يتكوّن النظير المشع C^{14} في طبقات الجو العليا نتيجةً لتفاعل نووي بين ذرات النتروجين والنترونات المتكوّنة من تصادمات الأشعة الكونيّة. يشكّل النظيران المستقرّان النسب:

C^{12} = %98.89، C^{13} =%1.11

يتمّ التجزؤ النظائري للكربون (أي تغيّر الوفرة النسبية للنظائر المستقرّة من وعاء جيولوجي معيّن كالبترول إلى وسط آخر كالكربونات) بعدّة طرائق أهمّها: عمليات التمثيل الضوئي التي تسبّب إثراءً للكربون الخفيف C^{12} في النباتات وبالتالي في كلّ المواد الحيّة، في حين تسبّب عمليّات التبادل النظائري بين غاز CO_2 وشوارد البيكربونات HCO_3^- الموجودة في الغلاف المائي إغناءً للكربون الثقيل C^{13} في هذه الأيونات.

1-2-توزّع الكربون في الطبيعة وأشكاله:

مع أنّ نسبة الكربون في مجموع الأغلفة الأرضيّة (الجوي والمائي والصخري والحيوي) لا تتعدّى 0.08%، إلّا أنّه يشغل المركز الثاني عشر من حيث الوفرة والأهمية في القشرة الأرضية.

يميل عنصر الكربون إلى التفاعل مع الأكسجين بشكلٍ كبير، وينتج عن هذا التفاعل عدد كبير من المركّبات، أهمّها أول أكسيد الكربون (CO)، وإذا كانت كميّة الأكسجين كافية يتشكل ثنائي أكسيد الكربون (CO_2). تتواجد النسبة العظمى من الكربون في **الغلاف الجوي** على شكل ثنائي أكسيد الكربون، الذي يشكل حوالي 0.03% من الطبقات السفلى من هذا الغلاف.

إنّ لوجود الكربون في **الغلاف المائي** ميّزاته الخاصّة، حيث يشكّل الكربون المنحلّ على شكل كربونات، هيدروكربونات وثنائي أكسيد الكربون أكثر من 90% من مجموع الكربون الموجود فيه، في حين لا يشكّل الكربون الموجود في المواد العضوية المنحلّة أكثر من 9% منه. يتمّ انتقال جزء من الكربون من المادّة الحيّة إلى الشكل الكربوناتي، من خلال التوازن الممثّل في التّفاعل التّالي:

$$CO_2 + H_2O = H_2CO_3 = HCO_3^- + H^+$$

تقدّر نسبة الكربون في **الصخور الرسوبية** بحوالي 1% من كتلتها، أي أعلى من نسبته في بقية أنواع الصخور، حيث تقدّر نسبة الكربون في الصخور النارية الأساسية وفوق الأساسية بـ 0.01%، وفي الصخور النارية الحامضية بـ 0.03%.

يوجد الكربون في الصخور الرسوبية بشكل رئيس على شكل مركّبات غير عضوية. يبلغ عدد الفلزات التي تحتوي على كربون غير عضوي 200 فلز، يتركّز الجزء الأساسي من هذا العنصر في فلزات الكربونات (كالسيت، أراغونيت ودولوميت...). بالإضافة إلى وجوده ضمن التوضّعات الخام الرسوبية بأشكالٍ صافية ونقيّة مثل الفحوم بأنواعها ذات الأهميّة الاقتصادية. يمكن للكربون أن يوجد

أيضاً على شكل مركّبات عضويّة يقدّر عدد أنواعها بالملايين. إنّه العنصر الأساس في المادة العضوية الحيّة والميتة (بروتينات، كربوهيدرات، حموض دبالية.....).

يوجد الكربون في الصخور النارية وفي الغازات البركانيّة بشكلٍ رئيس على شكل CO_2 وبدرجةٍ أقلّ بكثير على شكل CO وCH_4، في حين يوجد في المعطف السفلي وفي نواة الأرض على شكل كربيدات. يمكن اعتبار أماكن وجود الكربون المختلفة خزّانات تحدث بينها تبادلات للكربون نتيجةً للعمليّات العضويّة وغير العضويّة.

1-3-التمثيل الضوئي، قاعدة الإنتاج الإجمالي للمادة العضوية:

إنّ حدوث عمليّة التمثيل الضوئي هو حدث تاريخي بارز فيما يتعلّق بتشكّل الصخور المولّدة للنفط والغاز المحتملة. إنّ عملية التمثيل الضوئي، التي تُحوِّل الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية، هي بشكل أساسيّ عبارة عن انتقال الهيدروجين من الماء إلى ثنائي أكسيد الكربون، من أجل إنتاج مادّة عضويّة على شكل غلوكوز بالإضافة إلى إنتاج الأكسجين. إنّ مصدر الأكسجين المتحرّر هو جزيئات الماء، وليس ثنائي أكسيد الكربون. تستطيع الكائنات ذاتية التغذية تركيب السكريّات المتعددة، كالنشاء والسيللوز وغيرها من المكوّنات الضرورية، انطلاقاً من الغلوكوز الناتج عن عمليّة التمثيل الضوئي. يوضِّح الشكل (1-2) تركيباً مبسّطاً للتفاعل الناتج بعمليّة التّمثيل الضوئي:

$$3CO_2 + 6H_2O \rightarrow C_3H_6O_3 + 3O_2 + 3H_2O$$

(Tricose) تريكوز

↓

$C_6H_{12}O_6$

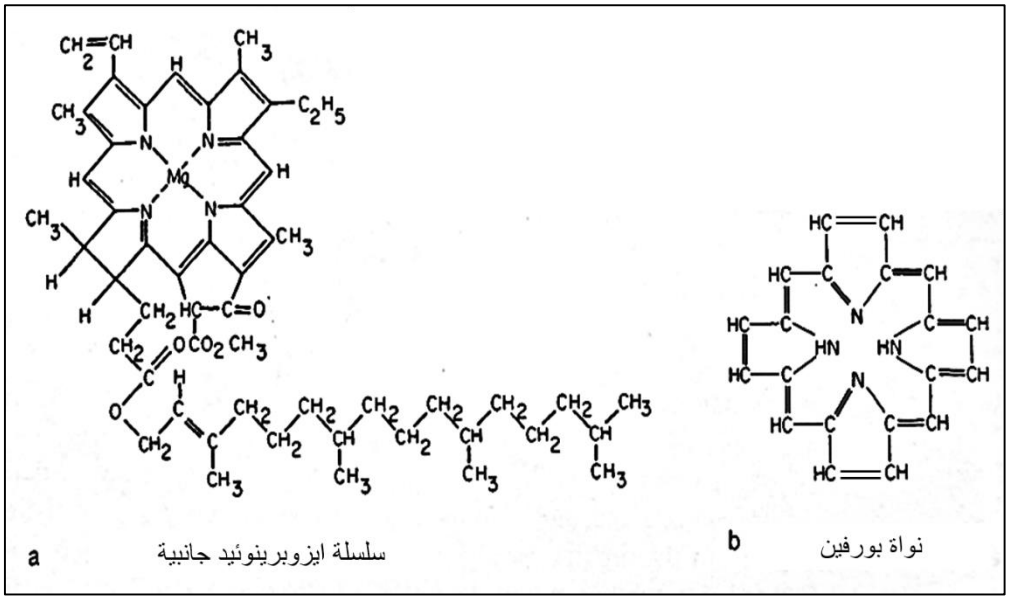
(Glucose) غلوكوز

↓

(Polysaccharides) سكريّات متعدّدة

الشكل 1-2: التفاعل الممثّل لعملية التمثيل الضوئي. يتشكّل الغلوكوز، الغني نسبياً بالطاقة الكيميائية، عن طريق النّباتات الخضراء التي تمتصّ كمّات من الطاقة (h.v) من ضوء الشمس. ينطلق الأكسجين كمنتج ثانوي لهذه العمليّة.

التمثيل الضوئي هو العملية الأساسية التي تؤمّن الإنتاج الإجمالي للمادة العضوية على الأرض. كانت الكائنات الحية البدائية ذاتية التغذية، مثل بكتريا التمثيل الضوئي والأشنيات الزرقاء – المخضرّة، أولى الكائنات الحيّة المسؤولة عن هذا الإنتاج الإجمالي. تعدّ صبغة الكلوروفيل الخضراء الماصّة للضوء أوّل شرط أساسي لعملية التمثيل الضوئي الشكل (1-3).



الشكل 1–3: (a) جزيء الكلوروفيل وهو الصباغ الأخضر الماص للضوء في النباتات، ووجوده شرط أساسي لعملية التمثيل الضوئي. يعدّ الجزء الفينيلي في الكلوروفيل مصدراً هاماً من أجل تشكل السلاسل الشبيهة بمركبات ايزوبرينوئيد في الرسوبيات والبترول، وبالمثل فإنّ نوى البورفين المحتوية على النتروجين تقود إلى تشكيل البورفيرين. (b) بنية نوى البورفين.

تكون عملية التمثيل الضوئي في الكائنات الحية البدائية ذاتية التغذية موزّعة بانتظام في كامل خلايا الكائن الحي، بينما تتركّز في الصانعات الخضراء لأوراق النباتات الأكثر تطوّراً. لذلك تُعدّ هذه الصانعات الخضراء كمعامل للتركيب الضوئي.

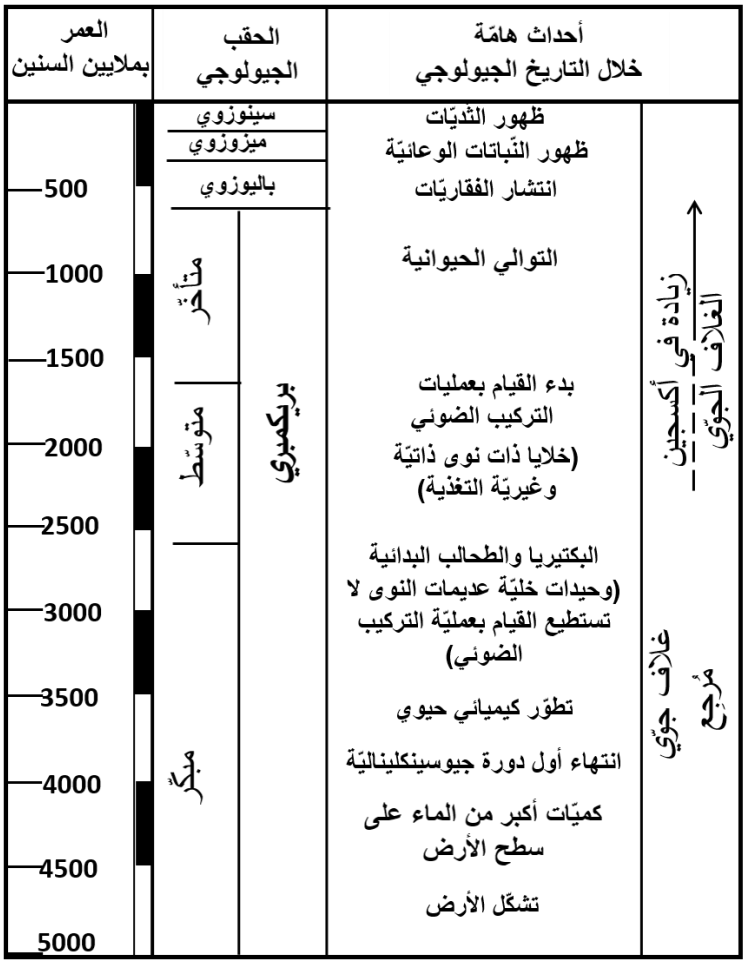
إنّ أقدم أشكال الحياة المسجّلة كانت منذ حوالي 3.1 إلى 3.3 مليار سنة على هيئة بكتريا وأشباه طحالب من مجموعة سوازيلاند *(Swaziland)* في جنوب أفريقيا. رغم ذلك فإنّه من الممكن أن يكون عمر الحياة على الأرض من عمر أقدم الصخور الرسوبيّة المعروفة على الأقلّ، أي منذ حوالي 3.7 مليار سنة. أثبت الباحث *Rubey* (1965) أنّ زمن تشكّل الرسوبيّات الأوّل كان قبل حوالي 3.7 مليار سنة، ونتج عن بحوثه أنّ الغلاف الجوّي كان يتركّب آنذاك ممّايلي:

91% من حجمه CO_2، 6.4% من حجمه N_2، 2% من حجمه H_2S، 0.2% من حجمه H_2O، 0.2% من حجمه HCl، إضافةً لبعض الغازات النّادرة جداً. يلاحظ غياب الأكسجين الحرّ. يفترض بأنّ إنتاج المادة العضوية عن طريق التمثيل الضوئي، كان قد بدأ بشكل فعلي منذ حوالي 2 مليار سنة، ويدعى ذلك الوقت بنقطة الصفر المرجعيّة.

يوضّح الشكل (1–4) خلاصة الأحداث الجيولوجية التي حدثت في تاريخ الكرة الأرضية والتي تعتبر هامّة في دورة الكربون العضوي. لا توجد حياة من دون الماء، وعليه فإنّ الحياة الوفيرة ولو

على مستوى عالٍ من البدائية كانت غير ممكنة قبل 4 مليار سنة من الآن، أي حتّى تواجد الماء كمادّة شائعة على سطح الأرض. كان الغلاف الجوي مُرجِعاً خلال تلك الفترة البدائية، أي لم يكن هناك أكسجين حرّ عملياً. ومن المحتمل أنّ مليار سنة أخرى قبل ذلك الوقت كانت ضرورية لحدوث انتشارٍ كافٍ للكائنات الحية المعزولة الأكثر بدائية، ليصبح الإنتاج الإجمالي للمادة العضوية عن طريق التمثيل الضوئي سائداً على مستوى الكرة الأرضيّة.

من المُتّفق عليه بشكل عام أنّ الغلاف الجويّ الأوليّ للأرض كان خالياً من الأكسجين الحرّ، وأنّه كان يحتوي على غازات الهيدروجين، الميتان، النشادر والنتروجين بالإضافة إلى الماء. وهذا الرأي لم يأتِ بالتزكية فقد طرحت فرضية الميتان والأمونيا بشكلٍ خاص. أشار كالفن (1969)، وفي ارتباط مع هذه الفرضية، إلى أنّ هناك تطوّراً حيوياً أو كيميائياً كان قد بدأ قبل حوالي 4 مليار سنة.



الشكل 1–4: الأحداث التي من المفترض أن تكون ذات أهمية لتطوّر الحياة خلال تاريخ الأرض. حدث الإنتاج الإجمالي للمادة العضوية على الأرض منذ 2 مليار سنة من الآن حيث انتشر التمثيل الضوئي.

يحتمل أنّ الكائنات الحيّة البدائيّة كانت تستخدم جزيئات الكربون المنتج حيوياً كمصدر للطاقة للحفاظ على عمليات التركيب الغذائي وذلك مع ظهورها الأوّل منذ حوالي 3 مليار سنة، وبالتالي فهي الكائنات الحية الأولى التي اعتبرت غيريّة التغذية. لا يمكن للأعداد المتزايدة من هذه الكائنات غيريّة التغذية أن تستمر بهذه الطريقة. يُعتَقَد بأنّه مع مرور الوقت تستنفد هذه المتعضيات تقريباً كامل خزّان المادة العضوية المنتج حيوياً، ويصبح التمثيل الضوئي مصدر الطاقة.

استطاعت الأحياء غيريّة التغذية استخدام ضوء الشمس كمصدر إضافي للطاقة وأن تصبح مستقلة، واستطاعت مع تطورها الهروب من نقص الغذاء. تُظهر اليوم بعض الأنواع المحددة من البكتريا بنفسجية اللون هذه الخصائص، فهي تستطيع استهلاك المركّبات العضوية كما تحتوي على الصانعات الخضراء التي تقوم بعملية التمثيل الضوئي.

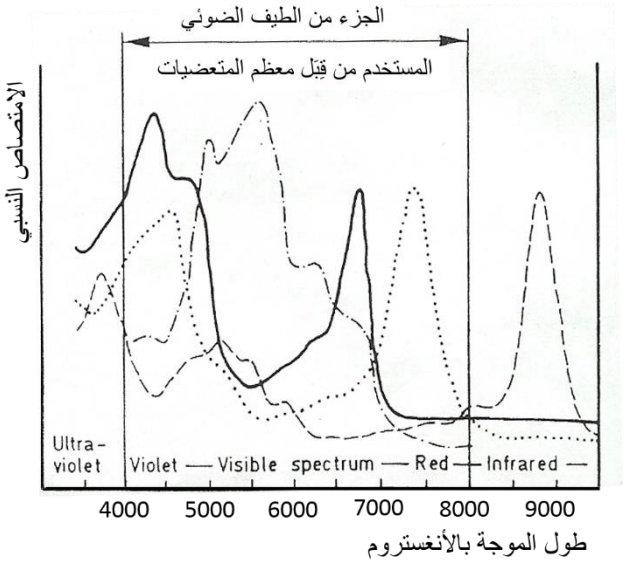
لم يكن الشكل الأقدم لعملية التمثيل الضوئي التي تقوم بها البكتريا مُنتِجاً للأكسجين، إنّ بكتريا التمثيل الضوئي غير هوائية فهي تستخدم كبريتيد الهيدروجين H_2S بدلاً من الماء كمانح للهيدروجين، ولذلك فهي تعطي الكبريت بدلاً من الأكسجين.

ربّما كانت بعض الطحالب الزرقاء – المخضرّة أولى المتعضيات المنتجة للأكسجين، ومع أنّها تملك عدداً من أصبغة التمثيل الضوئي – إلّا أنَّ أيّاً منها لا يمكن أن يحلّ محلّ الكلوروفيل بشكلٍ تام (الشكل 1–3). تمتصّ جزيئات الكلوروفيل الطاقة الضوئية، التي تنقل الإلكترونات إلى سويّات طاقية أعلى، ثمّ ينتقل هذا الربح في الطاقة إلى الجزيئات الأخرى.

من المؤكّد أنّ الحديد ثنائي التكافؤ، في البيئة المرجِعة، كان موجوداً بوفرة في المحاليل المائية. يمكن لهذا الحديد أن يتفاعل مع الأكسجين المنتَج من عملية التمثيل الضوئي. من المحتمل جداً أنّ الصخور المحتوية على الحديد والمعروفة جيداً في البريكامبري قد تشكّلت بهذا التفاعل عن طريق التمثيل الضوئي والأكسدة اللاحقة للحديد الثنائي إلى حديد ثلاثي التكافؤ، ومن ثم ترسّبت هذه الأكاسيد قليلة الانحلال.

تفوّقت الكائنات ذاتية التغذية، التي تقوم بعملية التمثيل الضوئي، على الكائنات غيريّة التغذية البدائيّة، وكنتيجة لذلك سرعان ما سيطرت على العالم الحيوي. ظهر التمثيل الضوئي، كما ذكر سابقاً، منذ حوالي 2 بليون سنة. وهنا كان تأسيس الهرم الغذائي وبدء تطوّر أشكال الحياة الأرقى. إنّه من المقبول أنّ الغلاف الجوّي للأرض قد أصبح مؤكسِداً بعد هذا الحدث، أي أنّ جزيئات الأكسجين الحرّة أصبحت متوفّرة.

يسمح التمثيل الضوئي باستخدام الطاقة القادمة من أشعة الشمس، ضمن نطاق ضيّق فقط من مجمل أشعة الشمس. يقع الجزء من الطيف الضوئي الذي تمتصّه معظم متعضيات التمثيل الضوئي في المجال بين 4000 – 8000 أنغستروم، وهو مساوٍ تقريباً للمجال المرئي لعين الإنسان. تُعتبر الأشعة ذات أطوال الموجة الأقصر والطاقة الأعلى مؤذية للحياة. يمكن أن تستخدم الأجزاء المختلفة من التمثيل الضوئي ضمن المجال المرئي من قِبَل كائنات التمثيل الضوئي المختلفة. يحدّد الجزء الممتصّ بنمط الصباغ الذي يستخدمه الكائن الحيّ (الشكل 1–5)، ممّا يمكّن الطحالب وبكتريا التمثيل الضوئي من العيش على مستويات أعماق مختلفة في نفس الجسم المائي. يُناسب العمق الأكبر الصباغ الذي يمتصّ الأطوال الموجيّة الأعلى.



ـــــــــ الطحالب الخضراء
..... البكتريا الخضراء
ـ . ـ . ـ الطحالب الحمراء
– – – – البكتريا البنفسجية

الشكل 1–5: تُـمتص الأجزاء المختلفة من طيف الأشعة المرئية من قبل كائنات التمثيل الضـــوئي المختلفة. هذا يســـمح لطحالب وبكتريـا التمثيـل الضـــوئي بـالعيش عنـد مســـتويـات مختلفـة من العمق في نفس العمود المائي.

1–4–العوامل العامّة المتحكّمة بالتمثيل الضوئي:

يُعتقد أنّ التمثيل الضوئي هو الشكل الأكثر أهمية للإنتاجية الأوليّة على الأقل في الـ 3.5 مليار سنة الماضية ويتضمّن تحوّلات أكسيد الكربون في الخلايا العضوية للمادّة باستخدام الطاقة الضوئيّة. التركيب الكيميائي الذي يستخدم الكيمياء أكثر من الطاقة الضوئية لتثبيت الكربون هو عموماً أقل أهمية بكثير على الرغم من أنّه يمكن أن يكون هاماً محليّاً. **الضوء** إذاً عامل أساسي للإنتاجية الأولية.

إنّ **الماء** أساس الحياة ويعدّ مصدراً جاهزاً للهيدروجين المطلوب لعملية التمثيل الضوئي الهوائي. معظم العضويات التي تركّب ضوئياً هوائية: مثل النباتات الوعائية، الطحالب الجهرية (الطحالب البحرية)، الطحالب أحادية الخلية (الفيتوبلانكتون)، الطحالب الزرقاء – المخضرّة

(Cyanobacteria) وطحالب بروكلوروفيتيس (بدائية النوى – تفتقر للون الأزرق والأحمر). من الواضح أنّ توفّر الماء ليس مشكلة للعضويات المائية لكن يمكن أن يكون عاملاً هاماً متحكّماً بالإنتاجية الأوليّة الأرضيّة.

يملك بعض أكثر المناطق إنتاجيةً للكربون مثل الغابات المطرية المدارية (إنتاجية أولية سنوية صافية تقريباً 15.3 مليار طن كربون، الكتلة الحيوية تقريباً 3.40 مليار طن كربون) أكثر من مصدر كافٍ للماء، ومن المتوقع أنّ غابات الفحم الضخمة المتشكّلة منذ زمنٍ بعيد نَمَت في أراضي المستنقعات بفضل الهطول المطري العالي. يكون الماء في خطوط العرض العالية (المناطق القطبيّة) على شكل جليد لفترة طويلة من السنة وبالتالي فهو غير مناسب لنمو النباتات، ممّا يجعل معدّل الإنتاجية الأرضية العالي محصوراً بين خطوط العرض المنخفضة والمتوسطة تحت الشروط المناخيّة السائدة.

تؤثّر **الحرارة**، بالإضافة إلى تأثيرها غير المباشر الهام، بشكل مباشر في عملية التمثيل الضوئي، حيث تمنع درجات الحرارة المرتفعة إلى حدٍّ بعيد عمليّة التمثيل الضوئي بسبب تحطيم الأنزيمات والمكوّنات الخلويّة أو تعديلها.

1-5-موازانة الكربون العضوي خلال تاريخ الأرض:

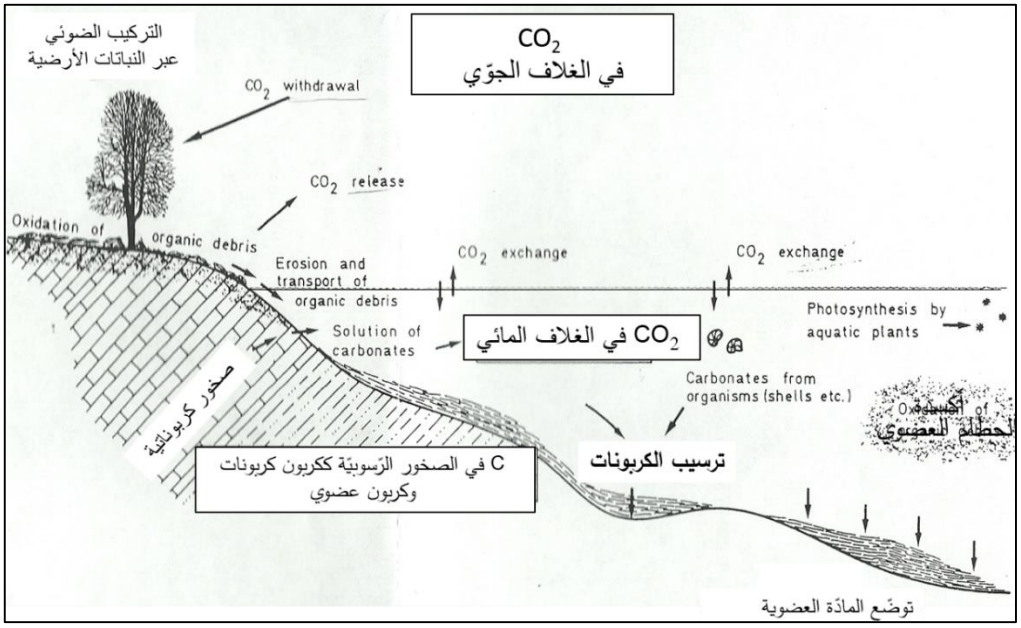
من أجل موازنة كتلة الكربون المستخدمة في التمثيل الضوئي خلال تاريخ الأرض، يجب إضافة كل الكربون العضوي الموجود على الأرض في الموارد الطبيعية المختلفة، مثل مياه المحيطات والرسوبيات، إذ يبلغ إجمالي الكمية المقدّرة للكربون العضوي والغرافيت، التي كانت تمثل سابقاً الكربون العضوي الرسوبي، ما يقارب 6.4×10^{15} طن، كما تشير تقديرات أخرى أكثر حداثة للعالم هانت *Hunt* (1979) أنّها أعلى بحوالي مرّتين.

يتضمّن هانت في حسابات موازنته للكربون العضوي أيضاً وجوده في البازلت والصخور النارية الأخرى كالصخور الغرانيتية وكلّ الصخور المتحوّلة. إنّ الأصل الحيوي لكثير من هذا الكربون العضوي هو موضع تساؤل. من المعروف أنّ معظم الكربون على الأرض يتركّز في صخور القشرة الأرضية الرسوبية. يكون جزء منه ثابتاً ككربون عضوي، والجزء الأعظمي ككربون-كربونات.

تشير التقديرات إلى أنّ 18% من إجمالي الكربون في الصخور الرسوبية هو كربون عضوي وأنّ 82٪ من الكربون الرسوبي مرتبط على شكل كربونات. توجد بالطبع علاقة بين الكربون العضوي وكربون الكربونات.

إنّ CO_2 المختزن في الغلاف الجوي هو على تبادل مستمرّ مع CO_2 المختزن في الغلاف المائي. يمكن للكربونات أن تترسب أو توضع في البيئة المائية انطلاقاً من الكائنات الحية (أصداف، هياكل عظمية) على شكل رسوبيات كربوناتية. يمكن، وعلى العكس، لصخور الكربونات أن تنحلّ لتساهم في تفاعل التوازن بين (HCO_3^-، CO_3^{2-}) و (CO_2) في المياه.

يمكن أن تتشكّل المادة العضوية الأوليّة مباشرة من خزان الغلاف الجوي من قبل النباتات الأرضية، أو عن طريق التمثيل الضوئي للنباتات البحرية بانحلال CO_2 في الغلاف المائي. بالمقابل، تتخرّب المادة العضوية الأرضية والبحرية بشكل كبير عن طريق الأكسدة. هكذا يُعاد تدوير CO_2 ضمن هذا النظام. يمثّل الشكل (1–6) تخطيطاً مبسّطاً للعمليات الرئيسة والمسارات المتعلّقة بعنصر الكربون في القشرة الأرضية.



الشكل 1–6: العمليات والمسارات الرئيسة التي تنطوي على عنصر الكربون. تركيز معظم الكربون على الأرض موجود في الرواسب، حوالي 18٪ ككربون عضوي، وحوالي 82٪ من كربون الكربونات. يتأكسد معظم الكربون العضوي الذي تنتجه الكائنات بسرعة إلى CO_2 وينتقل إلى مكامن CO_2 في الغلاف الجوي والمائي.

وُجِدَ الجزء المهمل تقريباً من الكربون العضوي في القشرة الأرضية، بما في ذلك الغلاف المائي، منحلّاً في الكائنات الحيّة. يتثبّت الجزء الأعظم من الكربون العضوي في الرسوبيات ويُقدّر بحوالي (5×10^{15} طن). يتثبّت جزء كبير آخر من الكربون العضوي الذي قدره حوالي (1.4×10^{15} طن) على شكل مادة شبه غرافيتية أو ميتا أنتراسيت، في الصخور المتحولة ذات الأصل الرسوبي جدول (1–1).

الجدول 1–1: الكربون العضوي في القشرة الأرضية ممثلاً بالـ 10^{15} طن:

الكربون العضوي والمنحل	0.003
الرواسب	5.0
الصخور المتحولة من أصل رسوبي (80% من الصخور المتحوّلة)	1.4
الكربون العضوي الكلي	6.4

إذا كان صحيحاً أنّ كلّ الكربون العضوي قد تشكّل بشكل مباشر أو غير مباشر عن طريق التمثيل الضوئي خلال تاريخ الأرض، يجب أن تكون هناك كمية من الأكسجين المتحرّر آنياً حسب معادلة التمثيل الضوئي، هذه المعادلة يجب أن تحسب كمية الأكسجين الحرّ، ثانية مع الأكسجين الحرّ السابق، والمستخدم حالياً في عمليات أكسدة مادة أخرى من المواد العضويّة الحيويّة.

يحوي الغلاف الجوّي الحالي نسبة من الأكسجين الحرّ تعادل (20.95% حجماً) وتوجد كميات منحلّة مختلفة منه في مياه المحيطات (تتراوح بشكل عام بين 2–8 مل O_2 بالليتر). وجد الأكسجين الذي كان حرّاً سابقاً في كلّ من المادة العضوية الحية والميتة. استُهلِك الأكسجين الحرّ الأكثر قدماً في أكسدة الأشكال المختلفة من الكبريت والحديد. ينحصر هذا الأكسجين اليوم في السولفات وفي أكاسيد الحديد ثلاثي التكافؤ، وهو مُنتَشِر في كافّة أنحاء القشرة الأرضية، بما في ذلك الغلاف المائي جدول (1–2).

الجدول1–2: الأكسجين الحرّ والذي كان حرّاً سابقاً في القشرة الأرضية، معبّراً عنه بالـ 10^{15} طن حصرياً من أكسجين الكربونات والسيليكات.

الغلاف الجوي	1.18
المحيطات	0.02
CO_2 الحيوي	0.16
الكبريتات البحرية المنحلة SO_4^{-2}	2.6
SO_4^{-2} المبتخرات	10.2
$Fe_2O_3 \longleftarrow FeO$	2.7
الأكسجين الكلي	16.9

يُعتقد، كما ذكرنا سابقاً، أنّ الغلاف الجوّي الأوّليّ للأرض كان مُرجِعاً، وظهرت عناصر الكبريت والحديد فقط بأشكال ثنائية التكافؤ. يُنتَج الأكسجين عن طريق التمثيل الضوئي، لذلك، فإنّه كان يُستخدم لأكسدة السولفيدات إلى سولفات، والحديد الثنائي إلى ثلاثي التكافؤ.

يُقدَّر الأكسجين الحرّ الكلّي والأكسجين الحرّ السابق الموجود على الأرض بـ 16.9×10^{15} أطنان تقريباً والكربون العضوي بـ 6.4×10^{15} وهي مشابهة للنسبة الكتلية لهذه العناصر في جزيء CO_2 كما نلاحظ من خلال العلاقتين:

$$2.66 = \frac{32}{12} = \frac{O_2}{C}$$

$$(2.64 = \frac{16.9}{6.4} = \frac{\text{الأكسجين الحرّ السابق} \times 10^{15}}{\text{الكربون العضوي في الصخور} \times 10^{15}})$$

يبيّن حساب توازن الأكسجين والكربون العضوي على أساس التمثيل الضوئي أنّ الأكسجين غير المرتبط بالكربونات والسيليكات قد أنتج في الحقيقة عن طريق التمثيل الضوئي. لذلك يجب أن تكون هناك علاقة بين الكربون العضوي في الرسوبيات المستحاثة ومستويات الأكسجين في الغلاف الجوّي القديم.

تمّ –باستعمال ما يسمى بأعمار نصف الكتلة للصخور الرسوبية– كما أعطيت من قِبَل *Garrels* و *Mackenzie*، معدّل تراكم للكربون العضوي مساوٍ تقريباً لـ 3.2×10^6 أطنان في السنة. تمّ الحساب على أساس الأرقام المذكورة سابقاً.

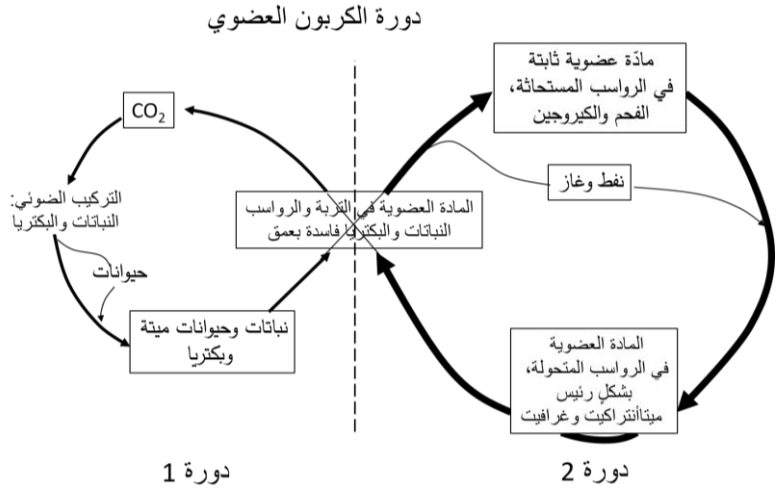
يتوقع أن يكون الإنتاج السنوي للبحر الحالي من الكربون العضوي 6×10^6 أطنان. يمكن، مع هذا الإنتاج البحري السنوي، حساب الحفظ الكلّي للكربون العضوي هو 10^{-4} أو 0.01 % سنويّاً خلال تاريخ الأرض. بالرغم من صعوبة تقدير الحفظ الحقيقي، يبدو أنه من الآمن الافتراض أنّه أقل من 0.1%.

قدّر كل من *Ryther* و*Menzel* أيضاً أنّ حوالي 0.1% من الإنتاج السنوي للمادة العضوية مدفون في الرسوبيات السطحية. يتمّ حفظ هذا الجزء الصغير جداً من المادة العضوية فقط في الرسوبيات، بينما يعاد تدوير ما تبقّى، خصوصاً في نطاق المنطقة المضاءة للطبقة المائية العليا في المحيطات. لهذا يتحدث علماء المحيطات عن نظام مغلق مع أخذ العوالق النباتية الحية وCO_2 في مياه المحيطات بالحسبان.

وجد *Deuser* في دراسة حول أصل المادة العضوية ومصيرها في البحر الأسود أنّه تمّ التوصّل إلى نسبة حفظ 4% التي تعتبر كحدٍّ أعلى، فقط في ظلّ ظروف ملائمة، كتلك السائدة في البحر الأسود. هذه الشروط هي: الأكسجين الحرّ وجسم الماء الهادئ قليلاً، دون كنس للحياة القاعية في الأسفل باستثناء البكتريا غير الهوائية. هذا ويشير إلى أنّه من الممكن جداً أن يكون قد حدث ترسيب لبعض صخور النفط المولّدة تحت شروط مماثلة.

هناك، وفي كثير من الأحيان، تناوب بين البيئات المناسبة لإنتاج المادة العضوية وحفظها وتلك التي يحدث فيها حفظ أقلّ بكثير للمادة العضوية في الرواسب. خير مثال على ذلك هو تناوب سلسلة من الرواسب المتصفحة الناعمة، على التوالي، مع طبقات غنية وفقيرة بالكربون العضوي موصوفة في رواسب البحر الأسود الفتيّة.

يمكن تمييز دورتين للكربون العضوي في الطبيعة، الشكل (1–7). الأولى صغيرة ابتدائية (1)، مع إجمالي حركة لحوالي 2.7 إلى 3 × 10^{12} أطنان من الكربون العضوي، ونصف عمر يتراوح من أيام وحتّى عشرات السنين. هناك أيضاً، الثانية كبيرة ثانوية (2) تضم كميّة تُقدّر بالطن، مع نصف عمر يقدر بعدّة ملايين من السنين.



الشكل 1–7: الدورتان الرئيستان للكربون العضوي على الأرض. يُعاد تدوير الكربون العضوي بشكل رئيس في الدورة 1. الانتقال من الدورة 1إلى الدورة 2 هو تسرب صغير يقدّر بـ 0.01–0.1% فقط من الإنتاجية العضوية الأوليّة.

ترتبط الدورتان بينهما عن طريق تسرّب طفيف لحوالي 0.01٪ إلى 0.1٪ من الكربون العضوي الكلّي، وهو ما يمثّل أكسدة المواد العضوية الرسوبية إلى CO_2. إنّ الدورة الثانوية الكبرى هي ذات الأهميّة الأكبر.

منذ دخول المادة العضوية إلى الراسب، يصبح مصيرها محكوماً بشكل أساسيّ بالأحداث التكتونية. بكلماتٍ أخرى، يحدّد كلّ من أطوار الإنغراز وزيادة الطمر، أو أطوار النهوض والتجوية، فيما إذا كان المحتوى العضوي للراسب قد حُفِظ وتحوّل إلى كربوهيدرات، أو أنّه تآكل وتأكسد.

في حال أكملت المادة العضوية الدورة الثانية خلال ولادة جيوسينكلينال وتطوّره ونهايته، فإنّها تخضع لزيادة الطمر، وتتعرّض للدياجينيز والكاتاجينيز، وأخيراً للتحوّل. إنّ لعمليات الدياجينيز والكاتاجينيز أهميّة أساسيّة لتشكّل النفط والغاز.

1-6-موازنة الكربون العضوي في البحر الأسود:

يمكن للبحر الأسود أن يخدم هنا كنموذج للشروط السائدة خلال تشكل رواسب صخور نموذجية مولّدة. المصدر الرئيس للمادة العضوية في البحر الأسود هو التمثيل الضوئي، الشكل (1-8).

تلعب الطحالب وحيدة الخلية المجهريّة الدور الأساسي المسيطر. تعتمد المجموعات الرئيسة للحياة البحرية بشكل مباشر أو غير مباشر على معدّلات إنتاجها للكربون العضوي. قد يتمّ إنتاج حوالي 100غ من الكربون العضوي بالـ م^2/سنة عبر كائنات التمثيل الضوئي الحيّة على كامل المنطقة المغطّاة بالماء -خلال الـ 2000 سنة الأخيرة. يتمّ بالإضافة إلى ذلك إدخال كمية معينة من الكربون العضوي (أقلّ من 10%)، بشكل رئيس، على شكل مادّة فتاتية عبر الأنهار وكذلك عن طريق بحرَي مارمارا و آزوف *(Marmara و Azov)*.

تُقدَّر مساهمة الكربون العضوي إلى البحر الأسود عبر الأنهار بما يقارب ثلث التزويد الكلّي. يساعد التصنيع الكيميائي، علاوة على ذلك، كمصدر للكربون العضوي. وهو الكربون العضوي الذي يعاد تصنيعه عن طريق البكتريا ذاتية التغذية، والذي لم تُحدّد كميّته بدقّة، ومن المتوقّع أن تكون أقلّ من 15غ كربون عضوي (C_{org}) بالـ م^2/سنة.

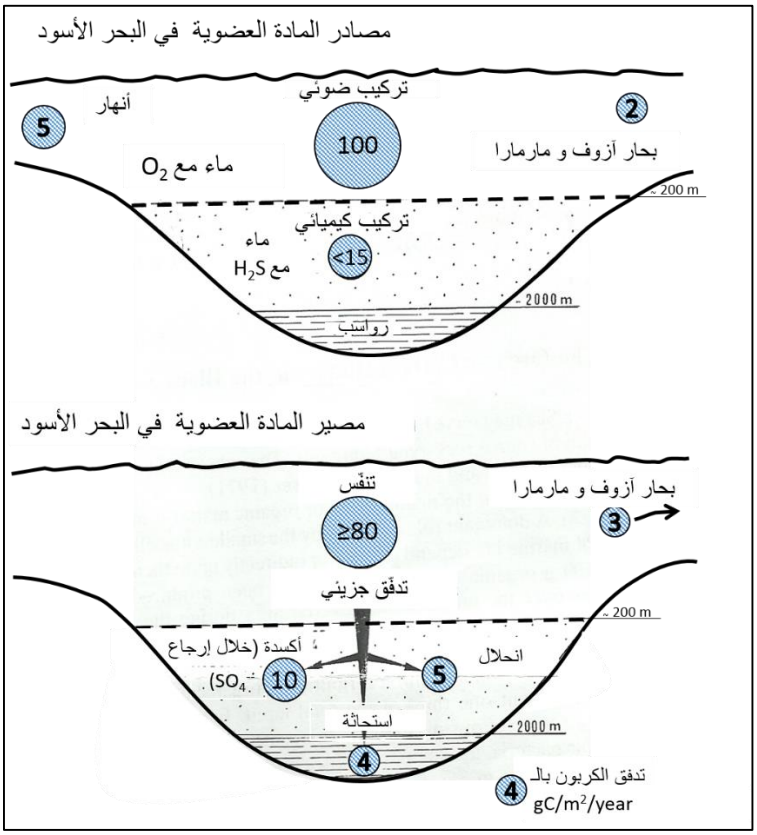
يتأكسد معظم الكربون العضوي المنتج، والذي يحمل إلى البحر الأسود، إلى CO_2 في الـ 200م العلوية بسبب التنفس، ويتمّ إرجاعها إلى النظام المائي – الجوي. قد تصل الكميّة التي تعود فوراً إلى دورة الكربون العضوي الأولي شكل (1-8)، وتتاح بالتالي مرّةً أخرى لعمليّة التمثيل الضوئي، بنسبة تصل إلى 80%.

يُحمَل جزء صغير أيضاً بعيداً إلى بحرَي مارمارا و آزوف. يتمّ نقل ما تبقّى إلى المياه غير المؤكسدة تحت نطاق الـ 200م العلوية، حيث تتعرّض هناك لهجوم كيميائي ميكروبي بشكل رئيس.

يبدو أنّه من الممكن الافتراض أنّ 80 إلى 95% من الكربون العضوي يعاد إلى قمّة العمود المائي، حيث يوجد نشاط التمثيل الضوئي.

يُفترَض أن يكون الوضع مستقرّاً في النطاق غير المؤكسد. تتمّ موازنة المادة العضوية التي تتأكسد نتيجةً لإرجاع السولفات، وإلى الضياع الناتج عن الانحلال والاستحاثة، عبر تدفّق كمية مماثلة من المادة العضوية من الأعلى، حيث تسود المياه المولدة للأكسجين.

يكون حوالي ربع كمية الكربون العضوي المدخل إلى النطاق غير المؤكسد للبحر الأسود مطموراً في الرسوبيات، وبالتالي مستحاثاً. تُقدّر هذه الكمية بـ 4% من مساهمة الكربون العضوي الكلية للبحر الأسود. هذا بالتأكيد أكثر من الكمية الوسطية للكربون العضوي المثبتة بشكل طبيعي في الرواسب البحرية.



الشكل 1-8: موازنة الكربون العضوي في البحر الأسود خلال الـ 2000 سنة الماضية. في الأعلى: تحسب مصادر المواد العضوية بالـ غ. م^2/سنة. في الأسفل: مصير المواد العضوية. يتثبّت حوالي 4% من مجموع التزويد (المدخلات) بالكربون العضوي في الرواسب. هذه القيمة هي أعلى بكثير مما هي عليه في المحيطات المفتوحة.

يعود السبب الرئيس لمعدّل الحفظ العالي في البحر الأسود بشكل رئيس إلى التحلّل الأبطأ للمادة العضويّة بغياب الأكسجين. يمكن أن تساعد نسبة الترسيب العالية أيضاً، لدرجة محدّدة، في حفظ المادة العضوية. ومن الصعب تحديد أهمية هذين العاملين في حفظ المادة العضوية، فهي تتغيّر بالتأكيد في البيئات والمواقع المختلفة.

من الواضح في بعض المناطق، كما في الدلتات، أنّ المعدل العالي من الترسيب أكثر أهمية من نطاق الماء غير المؤكسد، الذي يجب أن يكون له تأثير أكبر منه في الأجسام المائية المغلقة الراكدة.

بهدف المقارنة، فإنّ نهر الأمازون يفرّغ حوالي 10^{10} طن من الكربون العضوي في السنة. وهذا أكثر بحوالي 100 مرة من الإنتاج العضوي الكلي السنوي في البحر الأسود، إذ يمثّل نهر الأمازون 20% تقريباً من مجمل جريان الأنهار حول العالم.

تقسم المادة العضوية في المياه إلى مواد عضوية جزيئية (حية وميتة) ومنحلة (في الغالب الجزيئات أقلّ من 1 ميكرون). يكون حوالي 10^{7} طن تقريباً من إجمالي حمولة الكربون العضوي لنهر الأمازون في حالة منحلّة، والباقي هو مادة عضوية جزيئية. إنّ جزيئات المادة العضوية التي تحمل إلى البحر أكثر أهمية محليّاً. لأنّ توزّع المادة العضوية المنحلّة يكون أوسع نتيجة لامتزاج الكتل المائية.

بغضّ النظر عن العمليات التي تقود إلى حفظ واستحاثة المادة العضوية، فإنّها في غاية الأهمية لتشكيل صخور مولّدة محتملة.

الخلاصة والاستنتاج:

- يعدّ الكربون من أهم العناصر الداخلة في تركيب المادة الحية والمادة العضوية وجميع المركّبات الناتجة عن تطوراتها اللاحقة.

- يمكن اعتبار أماكن وجود الكربون المختلفة خزانات تحدث بينها تبادلات للكربون نتيجة للعمليات العضويّة وغير العضويّة.

- إنّ التمثيل الضوئي أساسيّ لإنتاج كميّات كبيرة من المادة العضوية. ظهر التمثيل الضوئي، منذ حوالي 2 بليون سنة في البريكامبري. هكذا تمّ تأسيس الهرم الغذائي وتطوّر أشكال الحياة في أعلى الهرم. إنّ الاغتناء بجزيئات الأكسجين في الغلاف الجوّي للأرض هو نتيجة مباشرة لعملية التمثيل الضوئي وإنتاج كميّات كبيرة من المادة العضوية.

- من المُتوقّع أنّ نسبة الحفظ الوسطي للإنتاج العضوي الرئيس ككربون عضوي، خلال تاريخ الأرض وعلى المقياس العالمي، أقلّ من 0.1%. يُقدَّر الحدّ الأعلى من معدّل حفظ الكربون العضوي، الموجود في بعض البيئات الفقيرة بالأكسجين والمناسبة لتوضّع رواسب صخور نموذجية، بحوالي 4%.

الفصل الثاني: تطوّر الغطاء الحيوي

مقدمة: من المعلوم تشكّل البترول وسلفيه (الكيروجين والبتومين) في البريكامبري (*Nonesuch Shale*، ميتشغان، أمريكا). يمكن أن تكون العوالق النباتية البحرية والبكتريا، بشكل رئيس، وبعض الطحالب القاعية والعوالق الحيوانية قد شكّلت، خلال الكامبري وصولاً إلى الديفوني، المادة المصدرية للبترول.

اشتقت بعد ذلك المادة العضوية القاريّة من مصدرٍ بديل وهو النباتات الأرضية. قد يكون لمستوى تطور متعضيات المصدر المساهِمة ونوعها تأثيراً حاسماً على نوع البترول المتولد من صخرٍ معيّن وكميته. لذلك يجب أخذ تطور الغطاء الحيوي وعلاقته بتشكل النفط بعين الاعتبار.

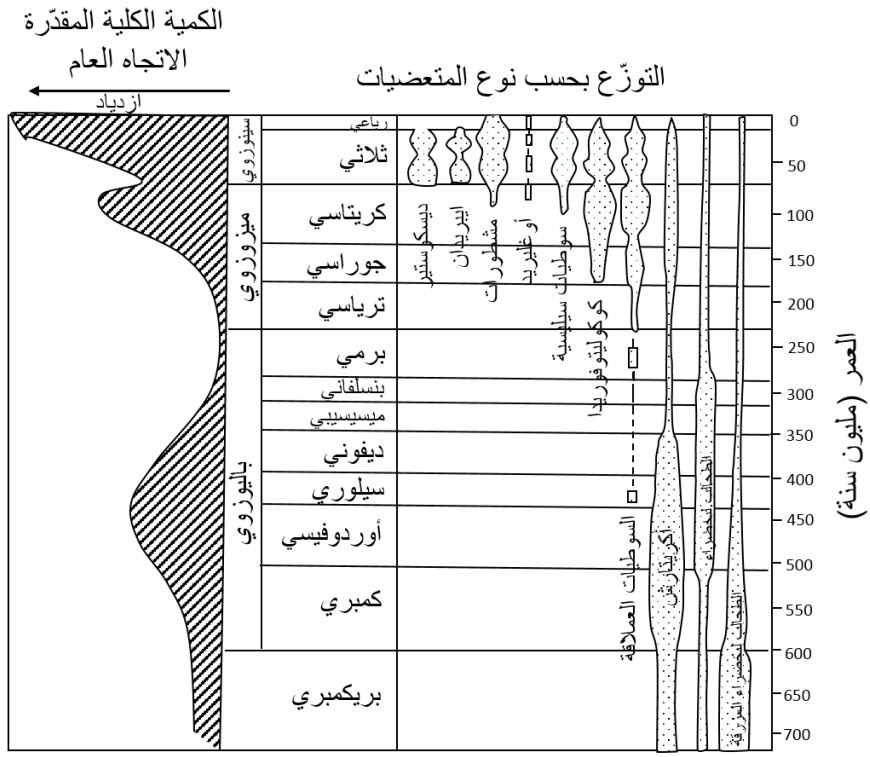
2-1-العوالق النباتية والبكتريا *(Phytoplankton and Bacteria)*:

كانت الطحالب الزرقاء – المخضرّة وبكتريا التمثيل الضوئي هي المنتج الرئيس للكربون العضوي في البريكامبري (أي منذ حوالي 2 بليون سنة). شكّلت مجموعة مختلفة من متعضيات العوالق النباتية البحرية والبكتريا والطحالب الزرقاء – المخضرّة، خلال الكامبري، الأوردوفيسي، والسيلوري، المصادر المسيطرة للكربون العضوي حتى ظهرت النباتات الأرضية على القارات وانتشرت بشكلٍ كافٍ في الديفوني الأوسط. يُقدّر إلى اليوم أنّ العوالق النباتية البحرية والبكتريا تشكل حوالي 50-60% من إنتاج الكربون العضوي عالمياً.

قدّر تابان *Tappan* (1968) وتابان ولوبليش *Tappan & Loeblich* (1970)، وبالاعتماد على الكثير من التحاليل، غزارة العوالق النباتية عبر الزمن الجيولوجي. يقدّم الشكل (2-1) تمثيلاً بيانياً، نرى فيه كيف بدأ إنتاج العوالق النباتية في البريكامبري وتزايد خلال الباليوزوي المبكّر ثم تناقص بشدة في الديفوني المتأخر. كان الإنتاج منخفضاً بشكل عام خلال البيرمي – كربوني والترياسي. حدث إنتاج أعظمي آخر في الجوراسي المتأخر – كريتاسي، وانخفض بشكل مفاجئ في نهاية الكريتاسي. كان الإنتاج في الباليوسين المبكّر والإيوسين لا يزال منخفضاً جداً. لقد تزايد سريعاً في الباليوسين المتأخر والايوسين وتناقص مجدداً في الأوليغوسين. أخيراً، كان الإنتاج الأعظمي في الميوسين متبوعاً بهبوط حتى المستوى الحالي من الإنتاجية.

سيطرت في الفترة الأولى من الإنتاجية المرتفعة للعوالق النباتية (بريكامبري – باليوزوي مبكّر) العوالق عضوية الجدران مثل الطحالب الزرقاء – المخضرة، مختلف الاكريتارش *(acritarch)*

والطحالب الخضراء. لم يكن لهذه العوالق هياكل مكونة من الكربونات، السيليكا، أو أي مواد معدنية أخرى.



الشكل 2–1: التغير في غزارة مجموعات العوالق النباتية المستحاثة والعوالق النباتية الكلية في الماضي الجيولوجي (عن تابّان ولوبليش، 1970). يُمثّل ظهور مجموعة ما عبر منطقة ضيقة والظهور الأكثر شيوعاً عبر منطقة أعرض.

يشير اسم اكريتارش *(acritarch)* إلى مجرّد مجموعة شكلية من حويصلات عضوية الجدران مقاومة للحموض مدوّرة، مضلّعة أو متطاولة، ناعمة أو مزخرفة، والتي من الممكن أن تكون كييسات طحلبية ما زال مصدرها عرضة للنقاش.

سيطرت العوالق الكلسية القزمة على المصدر الأعظمي الثاني في الجوراسي المتأخر – الكريتاسي، متضمنة الكوكوليتوفوريدة *(Coccolitophorida)* (هي نباتات طحلبية صغيرة وحيدة الخلية ذات هيكل كلسي) وغيرها من السوطيات.

ظهرت العوالق النباتية السيليسية وخاصة السوطيات السيليسية والمشطورات في الكريتاسي. أصبحت زيادتها هامة في السينوزوي. تعتبر السجلات المستحاثية غير كافية لتقويم إنتاجية البكتريا عبر الزمن الجيولوجي، حيث إنّ عملية استحاثتها تكون نادرة وذلك بسبب الحجم المجهري أو تحت المجهري ونقص الأجزاء الصّلبة.

تمّ تسجيل أمثلة عن البكتريا المستحاثة من جميع الأنظمة الجيولوجية بما في ذلك البريكامبري. غالباً ما تترافق البكتريا المستحاثة مع المادة العضوية كالأنسجة النباتية وبقايا الحيوانات والحشرات. كان معظم البكتريا المستحاثة بشكل عام شبيهاً بالأشكال الموجودة حاليّاً في بيئات مشابهة.

إنّ البكتريا والطحالب الزرقاء – المخضرّة كلاهما وحيدة الخلية من عديمات النوى وهي المتعضيات الوحيدة التي لا تمتلك أعضاء ذات أغشية محيطية كالنواة ضمن الخلية مثلاً وتُدعى *(Prokaryotes)* وتتميّز عن بقية وحيدات الخليّة ذات النوى المسماة *(Eukaryotes)* (أوكاريتوس). كانت البكتريا والطحالب، ولا تزال بلا شك، رائدة بيئياً.

تظهر البكتريا، خصوصاً، تقلّبات هائلة في فيزيولوجيتها هذا ما يمكّنها من العيش في كلّ مكان تقريباً ويضمن وجودها في كلّ مكان، ربما تكون البكتريا عضوية التغذية أو ذاتية التغذية (تمثيل ضوئي دون أكسجين) أو كليهما. إنّها مثال واضح عن النجاح التطوّري المرتبط كليّاً بتقلّباتها، وعدم تقيّدها، على ما يبدو، عبر الزمن الجيولوجي. يُعرَف حالياً أكثر من 100 نوع من البكتريا والمتعضّيات المرتبطة بها والتي تهاجم المادة العضوية في التربة والرسوبيات. لا يوجد سبب لافتراض أنّ هذه الحالة قد تغيّرت بشكلٍ حادّ منذ البريكامبري، عندما كانت كميات أكبر من الحطام العضوي متوفرة لأوّل مرة.

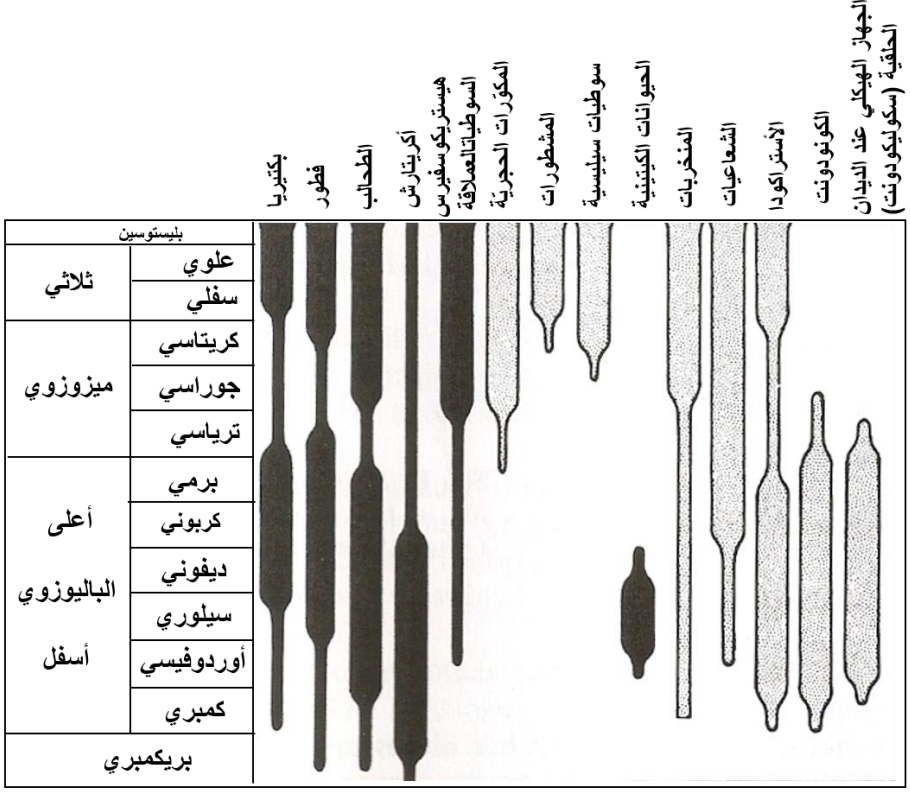
تأتي البكتريا الميتة، كما سيناقش لاحقاً، في الدرجة الثانية فقط بعد العوالق النباتية في مساهمتها في المادة العضوية المدفونة والمحفوظة أخيراً في الرسوبيات. تسبب العلاقة الأساسية في السلسلة الغذائية خلال هرم الحياة مضاهاة مباشرة في الوجود والتوزّع بين العوالق النباتية ذاتية التغذية *(Autotrophic)* والعوالق الحيوانية *(Zooplankton)* غيريّة التغذية *(Heterotrophic)*.

تميل الكتلة الحيّة للعوالق الحيوانية لأن تكون كبيرة في مناطق العوالق النباتية ذات الإنتاجية الكبيرة، حيث وجدت هذه العلاقة منذ ظهور متعضيات العوالق الحيوانية في البريكامبري، كالمنخربات وحيدة الخلية والشعاعيات. هذا ويطبق أيضاً على بقية المتعضيات من المملكة الحيوانية مثل الديدان *(Worms)*، الرخويات *(Mollusks)*، مفصليات الأرجل *(Arthropods)*.

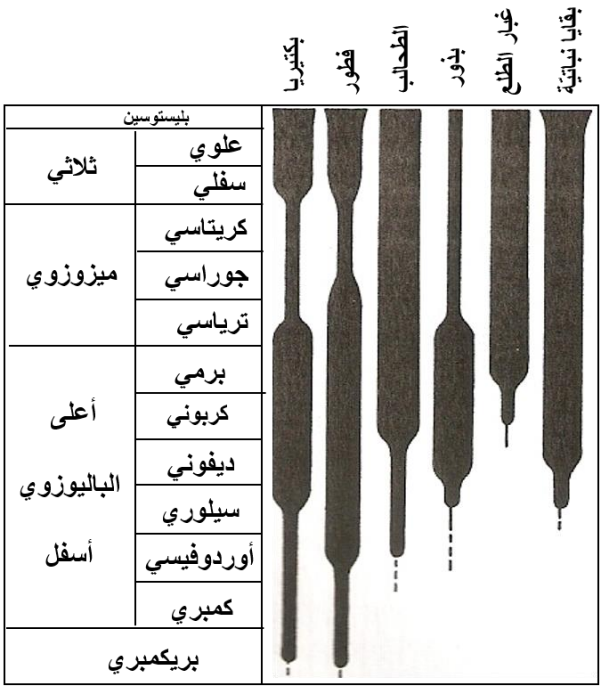
هناك دلائل قارية قليلة تشير إلى ظهور العوالق الحيوانية واللافقاريات الأخرى، بما في ذلك بزوغ الخطيّات *(Graptolites)* وانقراضها خلال الباليوزوي المبكّر (أوردوفيسي – سيلوري) وظهور عَرَضي لثلاثيات الفصوص *(Trilobites)* خلال الكمبري، الأوردوفيسي والسيلوري، وكذلك الظهور الهائل للمنخربات خلال الجوراسي المتأخر.

يجب اعتبار عوالق المنخربات كمساهمات رئيسة في المادة العضوية لرواسب بحرية معينة. على أية حال فإنّ كميّتها ووجودها مرتبطين بشكل أساسي بإنتاجية العوالق النباتية أي بوجود مصدر غذائي لهذه العوالق الحيوانية. الحيوانات الأكثر تنظيماً مثل الأسماك تساهم بمادة عضوية قليلة جداً في الرسوبيات بحيث إنّه يمكن تجاهلها عملياً.

من الممكن أن تكون الأطوار اليرقيّة، على أيّة حال، لأغلب الفقاريات قد ساهمت بكميات مختلفة من المادة العضوية منذ الكمبري. إنّ التقدير الكمّي لمساهمة مجموعات مختلفة من المتعضّيات مع إنتاجية عالية وكتلة حيّة خلال التاريخ الجيولوجي هو أمرٌ صعب. توجد في عدّة أصناف فقط من المتعضيّات كالعوالق النباتية (شكل 2–1). يظهر الشكل (2–2) والشكل (2–3) مجموعات رئيسة من المستحاثات المجهريّة ومساهمتها العضوية المحتملة للرواسب في البيئات البحرية وغير البحرية.



الشكل 2–2: التّوزّع الجيولوجي للمجموعات الرئيسة من المستحاثات المجهرية في البيئة البحرية (عن مور، 1969).



الشكل 2–3: التوزع الجيولوجي للمجموعات الرئيسة من المستحاثات المجهرية في البيئة غير البحرية (عن مور، 1969).

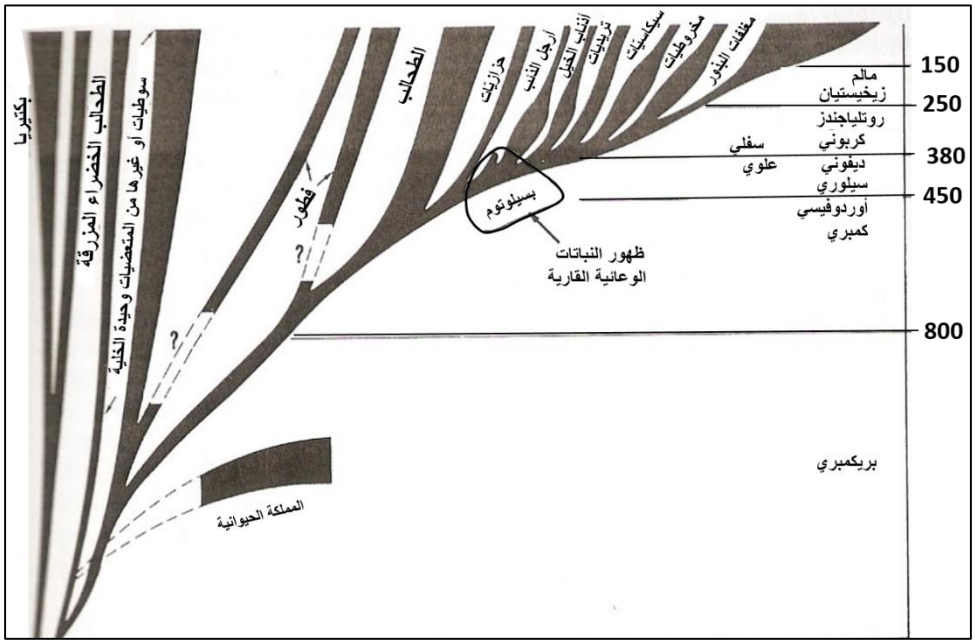
ليس المطلوب من هذه الأشكال أن تُظهر استمرارية بيئة ما وإنّما نوع المتعضّية المتاحة في هذه البيئة. تكون المستحاثات المجهرية الغنية بالمادة العضوية سوداء اللون، بينما تكون الأشكال التي تسيطر فيها مادة هيكلية غير عضوية منقطة وفاتحة اللون غالباً.

2–2–النباتات العليا *(Higher Plants)*:

تحتلّ النباتات العليا، بعد العوالق النباتية والبكتريا، المرتبة الثّالثة من حيث أهمية المساهمة في المادة العضوية ضمن الرسوبيات. تَظهر بقايا النباتات العليا، كما يوضّح الشكل (2–4)، في رسوبات السيلوري مع آثارٍ شائعة منذ الديفوني. تطوّرت أسلاف النباتات العليا عبر البريكامبري، الكمبري، والأوردوفيسي. لكي تتطوّر أسلاف النباتات العليا هذه والتي تتضمّن الطحالب الخضراء – المزرقة *(Blue–green algae)*، الطحالب الخضراء *(Green algae)* وأخيراً الطحالب العليا مثل طحالب البحر *(Seaweed)* وأعشاب البحر *(Kelp)* التي عاشت في البيئة البحريّة. فقد بدأ تطوّر النباتات القارية في السيلوري. وتدلّ مستحاثّات الأبواغ أنّ عدد أنواع النباتات القاريّة كان محدوداً في السيلوري، لكنّه أصبح أكثر تنوّعاً خلال الديفوني.

تعدّ التجمعات الغنية نسبياً بالأبواغ في رسوبيات السيلوري *(Wendlock–Ludlow)* من شمال أفريقيا ذات أهمية خاصة، بسبب عمرها المبكر، بالنظر إلى التاريخ التطوري للنباتات القارية.

وفقاً لسجلات المستحاثات الجهرية، فإنّ البسيلوبسيدا *(Psilopsida)* العائدة إلى مجموعة التريديات (نباتات سرخسية) *(Pteridophyta)*، لم تغز القارات قبل السيلوري المتأخر. فقد عاش بعض البسيلوبسيدا أيضاً في البيئة البحرية. ربّما كانت هذه النباتات الأولية عديمة الأوراق والجذور، غير أنّها كانت تملك نظاماً وعائياً بلا شكّ.



الشكل 2-4: تطوّر النباتات القارية الوعائية، فخلال السيلوري المتأخر هاجرت أوّل النباتات العليا، *(بسيلوتوم psilophyta)*، من البيئة البحرية وغزَت القارات (عن زيميرمان، 1969).

تطوّرت خلال الديفوني المبكر مجموعات أخرى من التريديات *(Pteridophyta)*. ظهرت في الديفوني الأوسط وربّما نتيجةً للتطور الهائل، معظم أصناف النباتات الوعائية، فقد أصبحت البسيلوبسيدا *(Psilopsida)* نادرة في الديفوني المتأخر، بينما سيطرت مجموعة تريديات أخرى مثل *(Lycopsida)* كالجنس (*Cyclostigma*)، و*(Sphenopside)* كالجنس (*Sphenophyllum*)، والسراخس المبكّرة (*Pteropsida*) على عالم نباتات القارة. إنَّ لنباتات الديفوني، على عكس نباتات القارة العائدة للسيلوري، أوراقاً صغيرة، جذوراً وأخشاباً ثانوية. كانت النباتات القارية في الديفوني المتأخر، وفق تقديرات عدة، مشابهة لنباتات الكربوني المبكّر. ظهرت خلال الكربوني المبكر أوّل بذور السراخس والتريديات البذرية. وأصبح جنس اللبيدوديندرون *(Lepidodendron)* نباتاً شائعاً. وصل هذا النمط من النباتات القارية، خلال الكربوني المتأخر، إلى أوج التنوع من حيث الشكل، الحجم والكمّ. تصبح الشجيرات (*Shurbs*) والأشجار الأكبر أكثر وأكثر شيوعاً خلال الديفوني المتأخر والكربوني مشكّلةً أخيراً غابات كثيفة وكتلة أخشاب كبيرة مركّزة حالياً جزئياً في عروق الفحم واسعة الانتشار في الرسوبيات، وباتجاه نهاية الباليوزوي، خلال البرمي، تظهر عاريات البذور *(Gymnosperms)* كقسم جديد من

النباتات منبثق من أصولٍ أبكر. لقد تضمّنت أصنافاً أوليّة مثل الصنوبريّات وغيرها..... وسيطرت على عالم النباتات حتى الكريتاسي. يدعى الزمن الممتد بين البرمي المتأخر والكريتاسي المبكّر، بسبب هذه السيطرة لعاريات البذور، باسم حقب عاريات البذور، ومن الملاحظ أنّ التريديات لم تلعب أيَّ دورٍ هام ملحوظ خلال هذا الزمن.

هناك نقطة تحوّل هامة أخيرة في تطوّر النباتات حصلت خلال الكريتاسي المبكّر، فقد تغيّر شكل الحياة النّباتيّة الأرضيّة بشدّة نتيجةً للظهور المفاجئ لمغلّفات البذور *(Angiosperms)* التي سيطرت سريعاً على عالم النباتات. على الرغم من أنّ الحياة النباتية الحالية تظهر تنوعاً واسعاً في مغلّفات البذور مقارنةً مع تلك الموجودة خلال الكريتاسي العلوي، فالنباتات ذاتها ما زالت تغطي مساحات واسعة من القارّات.

2-3-التّاريخ الجيولوجي للغطاء الحيوي:

إنّ تطوّر الغطاء الحيوي متداخل بشكل وثيق مع التاريخ الجيولوجي، ولا يمكن مناقشته بشكل منفصلٍ عنه. اعتمد في توضيح الاثنين جزئياً بشكلٍ مختصر وفق أسس افتراضية، على أفكار وطروحات بولو (1959) بشكل كبير، فعبر التاريخ الجيولوجي كان تطور النباتات دوماً متقدماً بخطوة على تطوّر الحياة الحيوانية. خلال جميع مراحل التّطور، كانت النباتات تغزو أنظمة جيولوجية جديدة أولاً، ثم تتبعها الحيوانات لاحقاً.

عندما سيطرت الطحالب على الغطاء الحيوي، خلال الباليوزوي المبكّر، وجدت فقط كميّات ضئيلة من عديمة الفقاريات البحرية مقارنةً مع النباتات. تمثَّلَ الفائض الضخم في إنتاجية النباتات الدنيا في ذلك الوقت عن طريق الطَفَل البحري الأسود، الغنيّ بالمادة العضوية والتي هي المصدر (الطبيعي) لرسوبيات البحار المفتوحة في الكمبري، الأوردوفيسي والسيلوري.

تكوّنت بنى طينية مماثلة أقل شيوعاً خلال فترات لاحقة في البيئات البحرية وكان وجودها محدوداً بحالات باليوجغرافية خاصّة. من أمثلة هذه الحالات الخاصّة: الأحواض البحرية المغلقة كاللاغونات، المساحات المائية الكبيرة كالمحيط الأطلسي المبكّر في الكريتاسي الأوسط.

تطوّر نوع من التوازن بين إنتاج النباتات والحيوانات المستهلكة للنباتات بعد السيلوري في البيئة البحرية المفتوحة. كان الفائض الطبيعي في إنتاجية النبات (الطحالب بشكل رئيس) منتهياً. لا يبدو أنَّ مستوى التطوّر الإجمالي للحياة البحرية النباتية والحيوانية للسيلوري المتأخر مختلف كثيراً عن مستوى التّطور البحري الحالي.

تراجعت سيطرة الإنتاجية العضوية البحرية، مع اكتساب القارات للنباتات الأرضية خلال الديفوني والسيلوري، إلى أن حصل نوع من التوازن بعض الشيء بين الإنتاجية البحرية والقارية في الكريتاسي.

انتقل فائض الإنتاجية بعد السيلوري، من البيئة البحرية المفتوحة إلى المناطق الساحلية، وإلى أحواض موازية حيث توجد توضعات فحمية للباليوزوي المتأخر، مع ظهور عاريات البذور خلال الكريتاسي المبكر، ثمّ انتقلت الإنتاجية الزائدة إلى المناطق القارية، وتشير التوضّعات الفحمية الكبيرة في العصرين الكريتاسي والثلاثي والتي مصدرها الأحواض الداخلية إلى هذا الانتقال.

الخلاصة والاستنتاج:

- كانت الإنتاجيّة الأوليّة الوحيدة للمادة العضويّة، ابتداءً من البريكامبري حتى الديفوني، هي العوالق النباتية البحرية.
- ساهمت كمية متزايدة من الإنتاجية الأولية للمادّة العضويّة عبر النباتات القاريّة العليا منذ الديفوني.
- يقدّر أنّ كلّاً من العوالق النباتية والنباتات العليا، في الوقت الحالي، تنتج كميات متساوية من الكربون العضوي. إنّ المساهمات الأربع الأكثر أهمية للمادة العضوية، كميّاً، ضمن الرسوبيات هي العوالق النباتية، العوالق الحيوانية، النباتات العليا والبكتريا.
- تساهم الحيوانات الرّاقية مثل الأسماك بمعدّل صغير جداً بالمادة العضوية في الرسوبيات التي يمكن إهمالها جزئياً. تظهر العوالق الحيوانية، وفقاً لقوانين السلسلة الغذائية، ميلاً لأن تكون أغزر في مناطق الإنتاجية العالمية للعوالق النباتية. تكون البكتريا غير القادرة على التمثيل الضوئي غزيرة عند وجود المادة العضوية كمصدر للغذاء.