

الفصل الرابع: العمليات الرسوبية وتراكم المادة العضوية

مقدمة: يتحكم بتراكم المادة العضوية في الرواسب عدد من الشروط الحدية الجيولوجية. إنه مقتصر عملياً على توضع الرواسب في البيئات المائية، التي يجب أن تتلقى كمية معينة دنيا من المادة العضوية. يتم التزويد بهذه المادة إما على شكل مادة عضوية جزيئية مية، أو حية، أو مادة عضوية منحلّة. قد تكون المادة العضوية محلية - غير منقولة (*autochthonous*) إلى البيئة التي توضع فيها، أي أنها نشأت في العمود المائي فوق الراسب الذي طُمرت فيه أو ضمنه، أو تكون منقولة (*allochthonous*)، أي غريبة عن بيئة التوضع. يجب أن يكون كُلاً من حالة الطاقة في الجسم المائي موضع السؤال والإمداد بالجسيمات الرسوبية المعدنية بحيث تسمح بنوع معين من الترسيب.

إذا كان مستوى الطاقة في الجسم المائي عالياً جداً هذا يعني: إما أن حجم تآكل الراسب أكثر من التوضع أو أن الراسب المتوضع خشن جداً بما لا يسمح بحفظ المادة العضوية ذات الكثافة المنخفضة. مثال على ذلك: منطقة شاطئية مع حركة أمواج قويّة. من المحتمل أن يكون انتشار الأكسجين، في الراسب خشن الحبات، كافياً عبر المسامات الواسعة المفتوحة. من جهةٍ أخرى: إذا كان مستوى الطاقة منخفضاً جداً، يكون التزويد قد تم بكمية قليلة من الراسب، وتكون هناك ترسبات عضوية مهملّة، تحصل أمثلة هذا النمط في أجزاء معينة من البحر العميق. يعتمد تراكم المادة العضوية في الراسب، حالما تتحقق هذه الشروط الحدية، على التثائية بين العمليات التي تحفظ المادة العضوية وتركزها وتلك التي تحطمها وتفتتها.

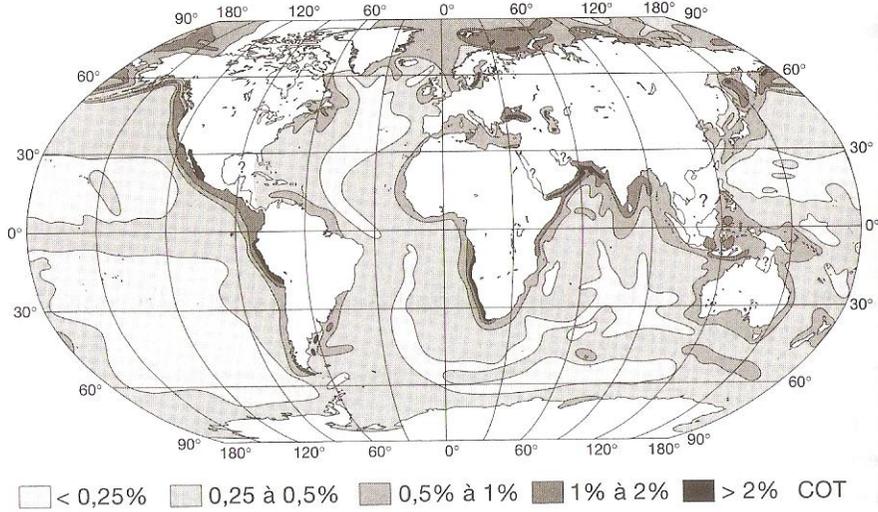
٤-١- توزيع المادة العضوية في الرواسب البحرية الحديثة:

سمح التحليل الدوري للرواسب البحرية السطحية من قبل علماء المحيطات - لا سيما العلماء الروس - خلال السنوات ١٩٦٠ حتى ١٩٧٠، بإعطاء فكرة عن تركيز الكربون العضوي في نطاقات المحيط المختلفة عبر أنماط مختلفة من الليثولوجيا (الجدول ٤-١).

يمثل غضار الهوامش القارية وسيلتها محتوى الكربون العضوي الوسطي (بالكتلة) الأكثر ارتفاعاً (حتى ١ %)، في حين أنها لا تمثل سوى ٠,٣ % للكربونات والرمال. يكون محتوى الكربون العضوي في المجال المحيطي العميق، أقلّ من ذلك بكثير (حوالي ٠,٢٥ % وسطياً) مهما كانت الليثولوجيا. سمح تجميع هذه القياسات واستكمالها بتمثيل خرائطي عالمي لمحتوى الرواسب البحرية السطحية من الكربون العضوي (الشكل ٤-١).

الجدول ٤-١: مقارنة الكتلة الوسطية للكربون (بالنسبة المئوية) في نطاق القارة والنطاق البحري العميق، تبعاً لليئولوجيات المختلفة المصادفة والكمية التي تمثلها كل خانة (الكربون العضوي الكلي TOC).

الكتلة (١٠ ^{١٦} طن)	TOC وسطي %	
		● السطحية القارية، ميل وانحدار
٠,٨٢	٠,٩٩	غضار وسيلت
٠,٠٨	٠,٣٣	كربونات
٠,٠٩	٠,٢٨	رمال
		● النطاق المحيطي
٠,٠٧	٠,٢٢	غضار وسيلت
٠,١٠	٠,٢٨	كربونات
٠,٠٤	٠,٢٦	رمال



الشكل ٤-١: خارطة تُظهر توزع محتوى الكربون العضوي (TOC %) في الرواسب البحرية السطحية. (بودان، ٢٠٠٧)

نحسب أنّ معظم الرواسب فقيرة بالمادة العضوية (غالباً ٠,٢٥ %) وأن المناطق التي تظهر تراكيز مرتفعة (٢ % وأكثر) متوافقة مع الهوامش القارية والبحار قليلة العمق. بالنتيجة، حتى لو ممّلت الهوامش القارية مساحة ضعيفة من المحيط، فإنّ غناها بالكربون العضوي، وتشكل ثخانة الرواسب المتراكمة في قاعها المجال الذي يتم فيه الاضطهاد الأساسي من المادة العضوية (الجدول ٤-١).

إنّ مناطق الرواسب السطحية الغنية بالكربون العضوي تتوافق مع القطاعات التي يكون فيها الإنتاج السطحي قوياً. هذه الأخيرة تحدّد إنتاجاً مجلوباً قوياً أيضاً، مما يعني مدّاً هاماً من المادة العضوية باتجاه العمق، وبالتالي غنىً كمونياً للرواسب بالكربون العضوي.

يبدو أيضاً أنّ مناطق معينة من المحيط، منتجة جداً، لا تظهر رسوبيات غنية بالكربون العضوي بشكل خاص: هذه مثلاً حالة الهامش الموريتاني الذي هو واحد من أربعة نطاقات كبيرة لتيارات المحيط الصاعدة الغنيّة بالأكسجين، أو بحر اللابرادور. تعتبر مياه القاع في هذه المناطق من بين المناطق الأكثر احتواءً على الأكسجين والأكثر تهوية من المحيط، ممّا ينتج عنه تسهيل فساد المادة العضوية خلال سقوطها في العمود المائي وعلى مستوى السطح الفاصل بين الماء - الرسوبيات.

تُظهر المناطق ضعيفة الإنتاجية كبحر البلطيق أو البحر الأسود، وعلى العكس، رواسب أعماق غنية نسبياً بالمادة العضوية. يُفسّر محتوى الأكسجين الضعيف في المياه في هذه الحالة هذه التراكمات. العاملان الرئيسان اللذان يفسّران محتوى الكربون العضوي في الرواسب البحرية هما: الإنتاجية وغنى الماء بالأكسجين. غير أنّ عوامل أخرى تتدخل كذلك لتشكّل المزيد من الرواسب.

٤-٢- العوامل الرسوبية المؤثرة في تركيز المادة العضوية في الرواسب البحرية

الحديثة:

٤-٢-١ معدّل الترسيب:

أظهر عدد كبير من الدراسات وجود علاقة طردية بين معدّل الترسيب (أو بتعبير أكثر دقة: ثخانة الرواسب المتراكمة في واحدة الزمن) ومحتوى الكربون العضوي في الرواسب البحرية القديمة والحديثة. سعى الباحثون انطلاقاً من هذا الاعتبار وراء حساب معدّل تراكم الكربون العضوي، أي كتلة الكربون العضوي المتراكمة في واحدة السطح وفي واحدة الزمن. هذا ممكن عندما نوزّع المعطيات على كثافة الرواسب، ذلك أنّه من السهل حساب معدّل تراكم الكتلة لكلّ مكّون من الرواسب، فلزي أو عضوي.

قانون حساب معدّل التراكم الكتلّي لمكون X من الرواسب هو:

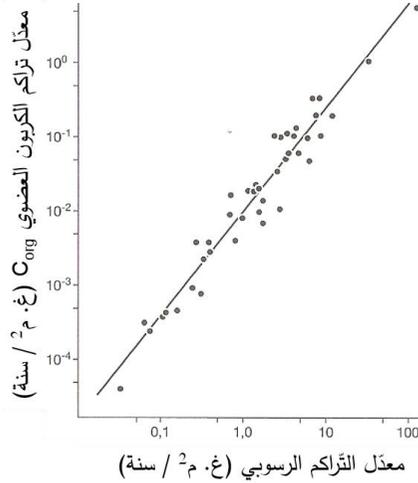
$$TAM(X) = (X \%) \times DS \times TS$$

TAM(X): معدّل التراكم الكتلّي لمكّون X.

DS: الكثافة الجافة للراسب الخام بال غ/سم^٣ أو كغ/م^٣

TS: معدّل الترسيب بال م/مليون سنة

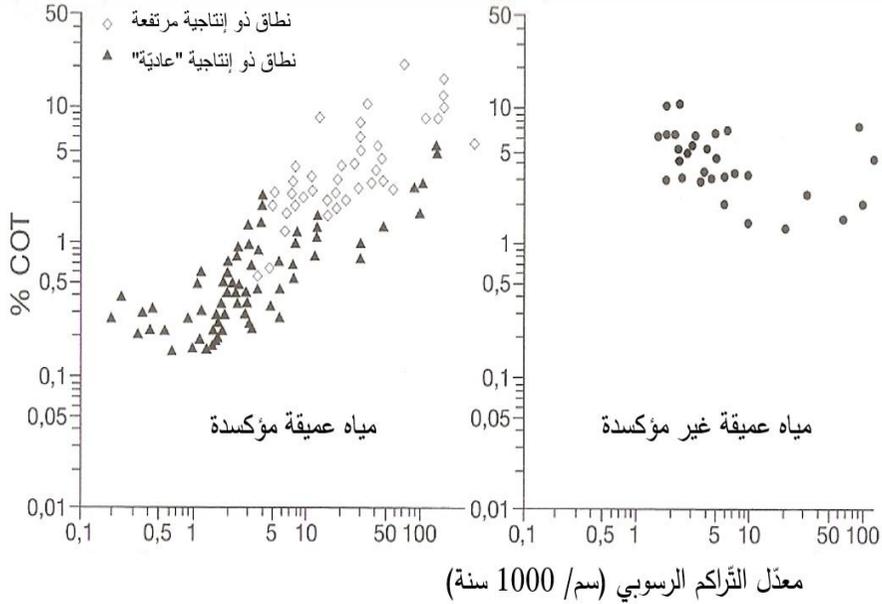
من الواضح جداً وجود علاقة طردية بين معدّل تراكم الكربون العضوي ومعدّل تراكم الرواسب (الشكل ٤-٢). هذا يفسّر عموماً، كأثر لحفظ أفضل للإنتاج المجلوب على القاع بتأثير تناقص قدرة الكتلة الحيوية القاعية على استهلاك هذه المادة العضوية.



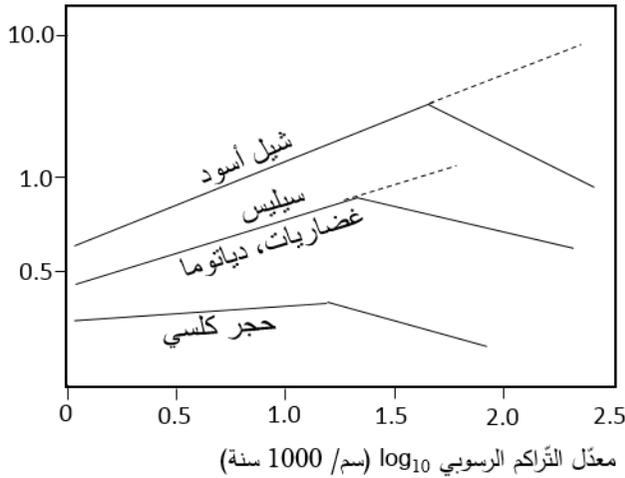
الشكل ٤-٢: مستقيم مضاهاة بين معدّل تراكم الكربون العضوي ومعدّل التراكم الرسوبي في البيئات البحرية الحالية (بودان، ٢٠٠٧).

السبب الرئيس هو أن معدّلات التراكم القوية تسرّع نقل المادة العضوية عبر مناطق الفساد المختلفة الهوائية وغير الهوائية، فتتناقص مدّة تماس الجزيئات العضوية مع عوامل فسادها. لذلك فإنّ البيئات ذات الإنتاجية الأولية القوية تكون ملائمة أكثر للاغتناء بمادة الرواسب العضوية من البيئات محدودة التغذية (الشكل ٤-٣).

تفوق المنتجات الأولية العضوية المنتجات الأولية من الأصداف الممعدنة في النطاقات جيدة إلى عالية التغذية. غير أن هذه العلاقة الطردية لا تتحقّق إلا إذا سادت في الوسط شروط مؤكسدة (2) $(-8 \text{ ml/l} = \text{oxygene})$ أو تحت مؤكسدة $(0,2-2 \text{ ml/l} = \text{oxygene})$ ، أو حيث تكون مجلوبات المادة العضوية الأرضية (بقايا نباتات قادمة من القارة) مهملة. لا يكون لمعدّل الترسيب تأثير حقيقي في الشروط غير المؤكسدة ($O_2 = 0 \text{ ml/l}$)، وتعتني الرواسب بالمادة العضوية، بشكل مستقل عملياً عن معدّل تراكم الرواسب (الشكل ٤-٣)، وذلك أنّ فساد الجزيئات العضوية هنا أبطأ منه في الشروط المؤكسدة. غير أنّه يجب ملاحظة أنّ العلاقة تصبح سلبية بالنسبة لمعدّلات الترسيب العالية جداً، ذلك أنّ تدفّق الجزيئات المعدنية يفوق عموماً تدفّق الجزيئات العضوية، ممّا ينتج عنه تناقص محتوى الرواسب من الكربون العضوي (الشكل ٤-٤).



الشكل ٤-٣: تغير محتوى الكربون العضوي (%COT) للرواسب البحرية الحالية مع معدل التراكم الرسوبي (بالدسم/ 1000 سنة). إلى اليسار، البيئات البحرية ذات المياه العميقة جيدة الأكسجة. إلى اليمين، البيئات البحرية غير المؤكسدة أي المحرومة من الأكسجين (بودان، ٢٠٠٧).



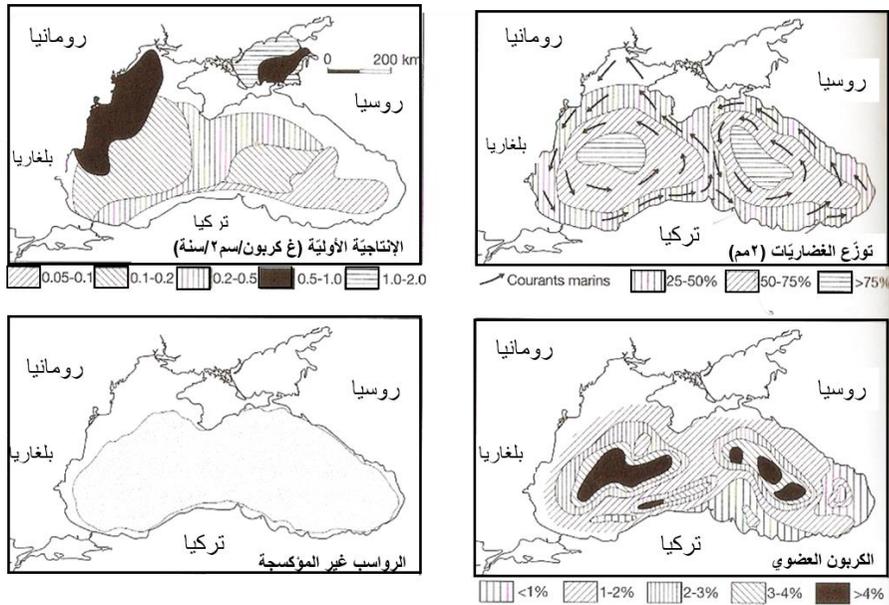
الشكل ٤-٤: تطور تركيز الكربون العضوي الكلي (بالدسم) للبيئات المختلفة بالعلاقة مع معدل التراكم الرسوبي (بودان، ٢٠٠٧).

يرتبط تأثير الإذابة هذا بالبيولوجيا. عندما يكون الترسيب كربونياً، تتدخل الإذابة بشكل أسرع منه في حال كان الترسيب بيوسيليسياً. أما في بيئات الشيل الأسود، فلا تتضح الإذابة هذه إلا إذا تجاوز معدل الترسيب ٤٠ م/ مليون سنة أو حتى ١٠٠ م/ مليون سنة بحسب بعض الباحثين.

تم إنشاء هذه العلاقات في البيئات البحرية الرباعية والتي يكون فيها تقدير الزمن موثقاً ودقيقاً، إنها على العكس أصعب بكثير أن تحدد في السلاسل الرسوبية القديمة حيث يكون معدل الترسيب معوقاً بسبب تأثير عوامل التراص (تؤثر في حساب أدوات التطبيق.....). مع ذلك، فإن أفضل حفظ للمادة العضوية المرتبطة بمعدلات تراكم ترسيبية متزايدة، ثم بانحلالها عندما تصبح هذه المعدلات هامة جداً، هذا ما تؤكدته دراسات عدة في السلاسل الرسوبية العائدة للميزوزوي والسينوزوي.

٤-٢-٢- الفرز الحبي ودور الفلزات:

إذا كانت معظم الدراسات، التي تُعنى بترسيب طبقات غنية بالمادة العضوية، تهتم بطبيعتها الكيميائية وبيناميكية الحوض الذي تم حفظها فيه، فإن هذه الدراسات غالباً ما تُهمل أن المادة العضوية تتربّب من جسيمات فيزيائية تتصرف كأية جسيمات رسوبية أخرى. يمكن ملاحظة مثال تقليدي عن هذه العلاقة، في البحر الأسود، تُظهر الخرائط المختلفة في الشكل (٤-٥) أن تراكيز الكربون العضوي ضمن الرواسب لا يعتمد فقط على الإنتاجية الأولية أو على الفقر الكبير بالأكسجين، بل يعتمد أيضاً على حجم حبيبات الرواسب.



الشكل ٤-٥: خارطة توزع كل من الإنتاجية الأولية، نقص الأكسجين مع العمق (اعتباراً من ٢٠٠٠م)، الحجم الحبي للرواسب، ومحتوى الكربون العضوي في رواسب البحر الأسود (بودان، ٢٠٠٧).

تميل المادة العضوية، ذات الكثافة المخفضة، لأن تتضمن للرواسب الأنعم، حيث تحدّ النفوذية الضعيفة من انتشار الأكسجين المنحلّ ضمنها، وهذا ما يجعلنا نعتبر أن تركيز المادة العضوية يزداد

مع انخفاض حجم الحبيبات (الجدول ٤-٢). كذلك تكون الغضاريات (> ٢ ميكرون) عموماً أكثر غنىً بالمادة العضوية بمزتين من السيلت (٤ - ٦٣ ميكرون) وأغنى بأربع مرات من الرمل الناعم (٦٣ - ٢٥٠ ميكرون).

(الجدول ٤-٢): تغير تركيز المادة العضوية بتغيير الحجم الحبيبي في تشكيلة (Vibing Shales) (كندا) (عن هانت، ١٩٦٣)، حيث: MO: مادة عضوية

حجم الحبات	MO% وسطي
سيلت < ٤ ميكرون	١,٧٩
غضار ٢ - ٤ ميكرون	٢,٠٨
غضار > ٢ ميكرون	٦,٥٠

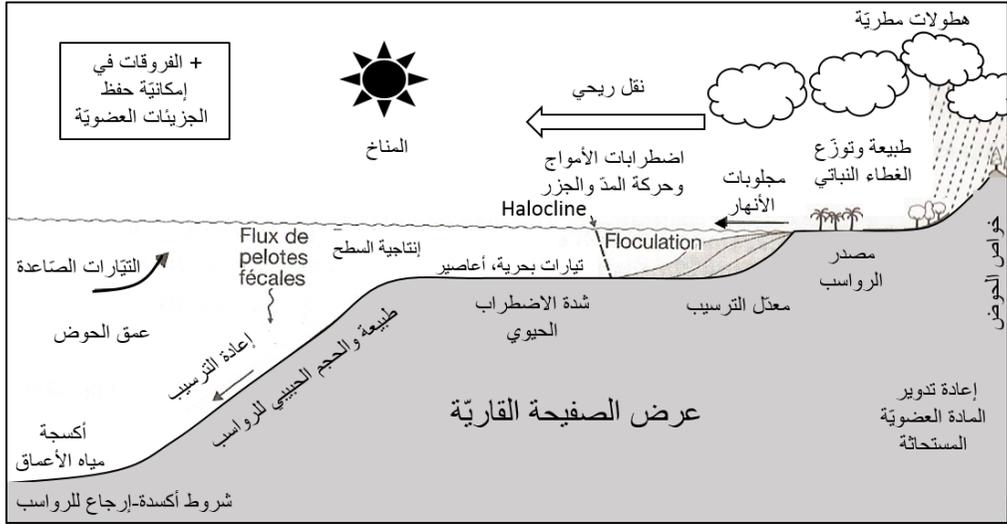
إن ألفة المادة العضوية والغضاريات معروفة منذ زمن طويل، لدرجة أنه تم الاقتراح بأن بنية الغضاريات أمكنها أن تخدم كدعامة وكنموذج للجزيئات العضوية الأولية التي ظهرت على كوكب الأرض. إن المادة العضوية، الممتزة على سطح الفلزات، تمثل بدون شك كتلة معتبرة لم يتم تقديرها بعد بشكل صحيح. يشغل هذا الموضوع في الوقت الحاضر الاهتمام والدراسة من قبل الرسوبيين والجيوكيميائيين.

٤-٢-٣- إعادة الترسيب:

هناك أثر آخر للعمليات الرسوبية في تركيز المادة العضوية وحفظها في الرواسب وهو إعادة توزيعها عن طريق تيارات الجاذبية. هذه التيارات التوربيدية تنقل (تغير مكان) توضع الرواسب - بما فيها الأجزاء العضوية - باتجاه الأجزاء الأكثر عمقاً من الأحواض، ويمكنها أن تساهم أيضاً في توضع طبقات أكثر غنى بالمادة العضوية أو أقل. هناك مثالان متعاكسان يظهران دور إعادة الترسيب على توزع المادة العضوية وتركزها. بحيرة (Tanganyika)، وهي إحدى البحيرات الكبيرة الشرق افريقية، تتميز بمنحدر ساحلي كبير جداً وتطبق للمياه مشروط بوجود مياه ساخنة على السطح وأكثر برودة في الأعماق. تساعد الشروط المناخية المحلية على الإنتاجية البلانكتونية، وكذلك تراكم المادة العضوية على القاع. الترسيب الأكسجيني للقاع يضطرب بانتظام بوصول رواسب توربيدية باتجاه الأطراف المؤكسدة للحوض، حيث تكون المادة العضوية أكثر فساداً بوضوح من الرواسب في مركز البحيرة.

على العكس، في حالة الهامش الأنغولي، تجلب التيارات التوربيدية في الوسط سحيق العمق (< ٢٠٠٠ م) المؤكسد رواسب غنية بالمادة العضوية متوضعة في الأعلى على المنحدر بمستوى النطاق الذي تكون فيه كمية الأكسجين أقل ما يمكن. وصولها السريع على عمق كبير وتغطيتها

بالغضاريات، يحمي المادة العضوية التي لم تتحلل إلا جزئياً بعد. إذا كان من الممكن مقارنة الجزيئات العضوية هيدروديناميكياً بالغضاريات والسيّلت فإنه يمكننا تطبيق المعاملات المستخدمة تقليدياً من قبل علماء الترسيب: كالحجم - الفرز - التلف - قابلية الطفو..... يمكن أن يزود تحديد هذه المعاملات بمؤشرات عن طاقة التوضع أو الترسيب، بالأخذ بالحسبان أنّ هذه المادة مؤلفة من الجزئين: المنقول ومحلي النشأة، يتم توزّع الجزيئات المنقولة بشكل أساسي بوساطة العمليات البيولوجية، ويمكن للعمليات الفيزيائية أن تساهم قليلاً في إعادة الترسيب، والشكل (٤-٦) يلخّص العوامل المختلفة المؤثرة في ترسيب الجزيئات العضوية.



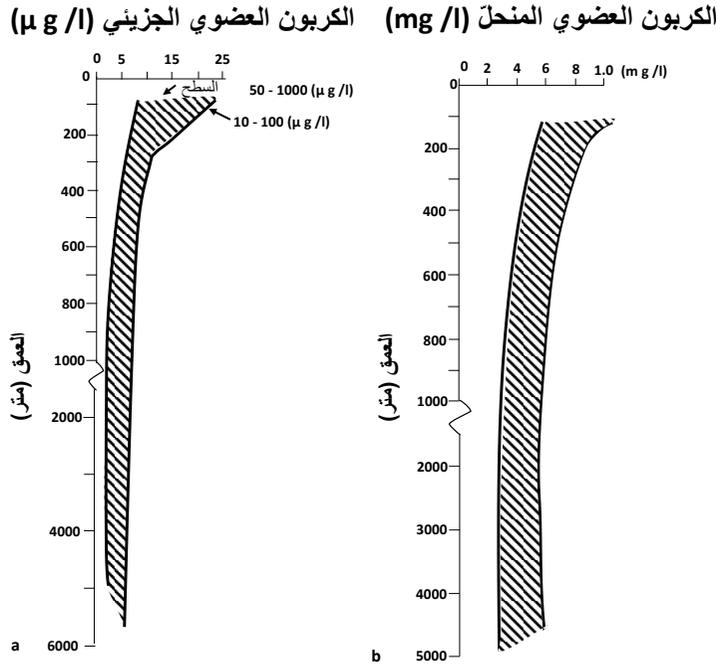
الشكل ٤-٦: العوامل المؤثرة في ترسيب الجزيئات العضوية .

كمثال يبيّن أهمية المادة العضوية المنقولة (*allochthonous*) في الرسوبات الحديثة نذكر ظهور كميات كبيرة من غبار الطلع في أسفل الرسوبات من البحر الأسود قرب الشاطئ الغربي. تحتوي هذه الرواسب، بالرغم من أصلها البحري الواضح، على مشتقات قارية أكثر من المشتقات البحرية بين أجزاء المادة العضوية المحددة مجهرياً، إذ يتعلّق توزيع أنماط غبار الطلع ببعدها عن خط الشاطئ.

٤-٣- دور المادة العضوية المنحلة والجزيئية:

توجد كميات كبيرة نسبياً من الكربون العضوي المنحل (*Dissolved Organic Carbon (DOC)*) في كلّ من ماء البحر والماء العذب. يُعرّف أخصائيو علم المحيطات الكربون العضوي المنحل (والذي يعني فعلياً المادة العضوية المنحلة والمحددة ككربون) بأنه المادة العضوية التي تمرّ من خلال المناخل ذات حجم المسام ٠,٤ أو ٠,٨ ميكرون. تدعى المادة العضوية المتبقية على المناخل بالكربون العضوي الجزيئي (*Particulate Organic Carbon (POC)*).

إنّ حالة التوزيع العمودي لكل من POC و DOC في المحيطات تكون متجانسة عملياً تحت عمق من 200 إلى 300م، يكون تركيز POC من 3 إلى 10 ميكروغرام كربون في اللتر، وتركيز DOC من 0,35 إلى 0,70، مع كربون في اللتر (الشكل 4-7). يكون التركيز فوق هذا العمق متغيراً، فبينما نجد أنّ POC تتناسب طردياً مع الإنتاجية الأولية من المادة العضوية. نرى أنّ DOC تتناسب عكساً مع هذه الإنتاجية.



الشكل 4-7: متوسط عمق توزع الكربون العضوي الجزيئي (a)، والكربون العضوي المنحل (b) في مناطق مختلفة من المحيط الأطلسي والهادي (بودان، 2007).

يستنتج من هذه البيانات ومن ملاحظة أنّ الحد الأدنى للأوكسدة يحدث عموماً في الأعماق الضحلة عادةً في المجال من 200 إلى 300م، أنّ دورة المادة العضوية تكون محصورة بمعظمها بالمياه السطحية الضحلة نسبياً. لا تحدث تحت هذا العمق، على ما يبدو، دورة للمادة العضوية، التي قد تكون ناتجة إما عن الطبيعة الخامدة بيوكيميائياً للمكونات أو عن التركيز تحت مستوى عتبة الاستخدام من قبل البكتيريا. يمكن أن ينتج أيضاً من قبل البكتيريا التي تصبح غير ناشطة تحت مستوى عمق محدد نتيجةً للضغط المتزايد.

قد تصبح الجزيئات الفلزية، خصوصاً الفلزات الغضارية المتوضعة خلال العمود المائي التي تحتوي مادة عضوية منحلة مكمّية بالمركبات العضوية (القطبية). مثل (ادمصاص الحموض الأمينية،

السكريات، المواد الفينولية ومركبات عضوية أخرى على سطوح الفلزات الطينية وجزيئات الكربونات في ماء البحر من قِبَل البعض وعدّها آخرون كتحويل للمادة العضوية المذابة إلى الشكل الجزيئي). يمكن أن يُفسّر الوزن الجزيئي العالي المركب للمادة العضوية في ماء البحر النسبة العالية جداً من المادة العضوية الكليّة. قد يلعب تكثيف المادة العضوية المذابة بالجزيئات المعدنية المعلّقة دوراً مهماً جداً في انتزاع المادة العضوية من الماء واندماجها اللاحق في أسفل الراسب.

تتوافق كل هذه الملاحظات مع الطريق المقترح في تشكيل الكيروجين:

1- تحلل مادة خلوية -2- مرغّب (منحل - ماء)، يحتوي الحموض الأمينية والكربوهيدرات - 3- حمض الفولثيك (*Fulvic acid*) -4- حمض الهيوميك (*Humic acid*) -5- الكيروجين. قد تدمج المادة الخلوية المتحلّلة جزئياً أو حتّى أجزاء كاملة من الكائنات الحية في هذه العملية من تشكّل الكيروجين. يمكن للمادة العضوية الجزيئية الفاسدة الناتجة مباشرة من تحليل العضويات أن تخدم أيضاً كمنمّز للعضويات.

٤-٤- آليات تراكم المادة العضوية الرسوبيّة:

أمكن، وبالاستناد إلى المناقشة السابقة بالإضافة إلى المعلومات المقدّمة في الفصول السابقة، تطوير مفهوم عن آليات تراكم المادّة العضويّة الرسوبيّة. تمثّل العوالق النباتية البحرية، بشكل عام، المصدر الرئيس للمادة العضوية في الرسوبيات البحرية، في حين يكون المصدر الرئيس، في بعض المناطق المائية الضحلة، حيث يوجد الضوء ويكون كافياً لعملية التمثيل الضوئي، هو النباتات القاعية البحرية.

اعتبرت البكتيريا التي تعيد بناء (*rework*) المتعضيات الميتة، في كلا المثالين، كمصدر أساسي إضافي للكربون العضوي. يمكن أن تكون المادّة العضويّة المنقولة (*allochthonous*) أرضيّة المنشأ، الممثلة بغبار الطلع والأبواغ وبقايا نباتية أخرى، مساهمة رئيسة أخرى في بعض أنماط الرواسب، خاصة تلك التي توضع في المناطق الشاطئية والدلتات.

هناك علاقة بين كمية المادة العضوية التي تزود بها بيئة التوضّع وبين تركيز المادة العضوية المتوضّعة في الرواسب. يكون الإمداد بالمادة العضوية أعظم في المناطق ذات الإنتاجية الأوليّة العالية، أي: على طول الهامش القاري، حول الكتل الأرضيّة، وخاصةً مناطق التيارات الصاعدة. يتغيّر عامل الإمداد هذا عبر تلك العمليات المسؤولة عن حفظ وتركيز المادة العضوية من جهة، والعمليات المسؤولة عن التخريب والتخفيف من جهة أخرى. تكون كلّ المواد العضويّة، تحت الشروط الجيولوجية السائدة على سطح الأرض، غير ثابتة. يُدعم حفظ المادة العضوية بعدد من العوامل.

تميل الإنتاجية الكبيرة للمادة العضوية لبناء بيئات ذات تركيز منخفض للأكسجين (E_n) تحت ($V_m 100+$)، أو عوز بالأكسجين مصحوباً بإنتاج H_2S (E_n سالب، تحت $V_m \cdot$) عبر بكتيريا إرجاع السلفات. يكون تحلل المادة العضوية وتحولها الى CO_2 مسؤولاً عن نقص تركيز الأكسجين. هذه العملية المتكررة هي سبب قلة الأكسجين في قاع المنطقة الضوئية (*Euphotic Zone*) من المياه البحرية.

يُخفّض تركيز الأكسجين المنخفض، أو غياب الأكسجين الحرّ ووجود H_2S معدّل تخريب المادة العضوية. تحت شروط كهذه، لا يكون الفساد سوى عبر الأكسدة المباشرة الى CO_2 . مع ذلك، يستمرّ فساد المادة العضوية بوجود نسبة قليلة من البكتريا غير الهوائية وغير ذاتية التغذية.

يعرّز ادمصاص كل من المادة العضوية المنحلة أو الجزيئية على سطوح الجسيمات الفلزية استقرارها بطريقتين. الأولى، محمية بشكل أفضل ضدّ الاستهلاك البيولوجي، والثانية، تستقر بسرعة عبر العمود المائي. إنّ زمن البقاء الذي يقضيه جزيء عضوي في العمود المائي الحاوي على الأكسجين هو أيضاً عامل هام.

تكون شروط تراكم المادة العضوية في المناطق الضحلة، حتى عمق عدة مئات من الأمتار، أفضل من المياه العميقة. يمكن أن ينتج نفس التأثير من التطبّق في المياه الأعمق، كإنتاج مثلاً عن المنحدر الحراري (*Thermocline*) والكثافة (*Pycnocline*)، اللذين يحذّان تبادل الأكسجين ويمكن بالتالي أن يسببا عوزاً بالأكسجين في المستويات الأكثر انخفاضاً. يمنع نقص الأكسجين أيضاً استهلاك المادة العضوية من قبل المتعضيات الهوائية غيرية التغذية. إنّ استهلاك المادة العضوية من قبل هذه المتعضيات الهوائية غيرية التغذية هو عامل أساسي في تخريب المادة العضوية.

يلعب معدّل توضع الجزيئات الرسوبية دوراً أساسياً في كلّ العمليات الرسوبية وكذلك في حفظ المادة العضوية وتركيزها. بافتراض تزويد ثابت بالمادة العضوية، سيكون تركيزها في الرواسب متناسباً عكساً مع معدّل توضع الجزيئات الفلزية. إنّ العلاقة بين توضع الرسوبيات وتركيز المادة العضوية ليست بهذه البساطة، ذلك أنها مرتبطة بعوامل أخرى وتتغير بتغيرها، مثل توزع حجم حبات الجزيئات الفلزية، طول العمود المائي ومدة وجود المادة العضوية فيه، وكذلك استهلاك المادة العضوية من قبل متعضيات غير ذاتية التغذية. تشير الملاحظات العملية إلى أنّ تركيز المادة العضوية في الراسب سوف يزداد مع زيادة نسبة التوضع، يمرّ تركيز المادة العضوية في الراسب بقمة (قيمة أعظمية).

يتصرّف جزء اللبيد من المادة العضوية، والذي يكون له أهمية خاصة للخور المولدة للنفط، أحياناً بشكل مختلف، في العمليات الرسوبية، عن المادة غير اللبيدية. يكون القسم الأكبر من الجزء

الليبيدي غير منحلّ في الماء، على عكس الجزء غير الليبيدي، أي المكوّنات الكربوهيدراتية والبروتينية ومشتقاتها.

بالإضافة إلى ذلك، تغطّي عدّة أقسام عالية المقاومة في المتعضّيات، كالأغشية، الفشرة، الأغشية الشمعية، البذور، حبوب الطلع والفلين، بالمواد شبه الليبيدية. نتيجة لذلك، هناك ميل عام للجزء الليبيدي للبقاء في المادة العضوية الجزيئية (*POC*) أكثر من المادة العضوية المنحلّة (*DOC*).

توضّعت المتعضّيات مباشرةً في الرواسب، طبعاً، بما في ذلك محتواها الليبيدي. بهذا يمكننا الاستنتاج أنّه يمكن أن تكون مساهمة المادة العضوية الجزيئية غير المنحلّة في الرواسب ذات أهمية أكبر، لصخر مصدري محتمل، من مساهمة المادة العضوية المنحلّة. تظهر البيانات في هذا المجال أنّ حجم $\delta^{13}\text{C}$ من ليبيدات المادة العضوية الجزيئية (*POC*) مشابه أكثر لمتوسط تركيب الليبيد في الراسب، ممّا هي عليه قيم $\delta^{13}\text{C}$ في الليبيدات المنحلّة. وجد كذلك أنّ قيم $\delta^{13}\text{C}$ في المادة العضوية المنحلّة (*DOC*) مشابهة جداً لقيمة متوسط الكربون العضوي الكليّ في الرواسب المتوضّعة في الأسفل. متوسط قيم $\delta^{13}\text{C}$ الليبيدات في الراسب كانت أخفّ بحوالي 6 بالألف من متوسط الكربون العضوي الكليّ.

إنّ التجاوزات والانسحابات عمليات مواتية لتوضع الرسوبيات الغنية بالمادة العضوية، فهي تحدث في المياه الضحلة التي يمكن أن تحوي إمداداً كافياً من المادة العضوية المحليّة والمنقولة، ونطاقات توضع لرواسب متوسطة إلى ناعمة الحبات.

إنّ المناطق اللاحقة للمياه الهادئة على المنحدرات القارية، ذات أهمية في فهم كيفية تشكل صخر رسوبي مولّد للبترو، مثال: اللاغونات ومصبات الأنهار والأحواض المائية العميقة المحصورة هي الأخرى بيئة مواتية لتراكم المادة العضوية. أمّا في المنحدرات القارية فيمكن للمادة العضوية أن تصل إلى تركيز عالٍ جداً.

يزداد تركيز المادة العضوية في رواسب المنحدر القاري عموماً باتجاه البحر. حالة خاصّة يمكن أن توجد مباشرةً تحت أساس المنحدر القاري، حيث يمكن للرواسب الغنية بالمادّة العضويّة أن تتراكم كنتيجة لانزلاق المنحدر إلى الأسفل.

أخيراً، يمكن الاستنتاج أنّ الرواسب الغنية بالمادة العضوية يمكن أن تظهر في كلّ مكان يكون فيه الإمداد بالمادة العضوية كافياً، والمياه هادئة بشكلٍ معقول، ومعدّل ترسيب وسطي من حبيبات فلزية ناعمة الحبات.

٤-٥- التركيب الكيميائي للكتلة الحيوية في كل من: البكتريا، العوالق النباتية،

العوالق الحيوانية، النباتات العليا:

علمنا في الفصول السابقة أنّ المساهم الرئيس في تشكيل المادة العضوية ضمن الرسوبيات هي كل من البكتريا، العوالق النباتية، العوالق الحيوانية (وخصوصاً المنخربات وبعض القشريات) والنباتات العليا. كما أنّ العلاقات الطبيعية المتبادلة بين هذه المجموعات المختلفة من الكائنات في الأقاليم ذات السحنات المختلفة هي التي تُحدّد تركيب المادة العضوية التي ستُرسّب وتُدمج في الرّاسب ونمطها.

إنّ ما يهْمُننا من مثل هذه العلاقات الطبيعية التي تحدث في المياه المفتوحة في مناطق الرّفوف، المنحدرات القاريّة والنّهوضات القاريّة هو التركيب الكيميائي للكتلة الحيوية للمتعضّيات الموجودة فيها. بشكل عام فإنّ المناطق السابقة تشمل كل من الهوامش القاريّة، الأراضي الكبيرة المغلقة، الأحواض المعزولة (البحار الهامشية) مثل البحر الأسود، بحر البلطيق، البحر المتوسّط والمسّطحات المائية الضحلة.

كما سنرى لاحقاً، تُعدّ اللبيّيات وأشباه اللبيّيات المكوّنة لهذه المتعضّيات من بين المركبات الكيميائية الأساسية التي تلعب الدور الأكبر في تشكيل البترول. لذلك سوف نُركّز في البحث التالي على مُكوّنات الكتلة الحيوية الكيميائية مع إيلاء اهتمام خاص لكل من اللبيّيات وأشباه اللبيّيات في البكتريا، العوالق النباتية، العوالق الحيوانية والنباتات العليا. ولكن لا تتوافر في الوقت الحاضر سوى كمية محدودة من المعلومات حول العلاقات الطبيعية بين هذه المتعضّيات وتركيبها الكيميائي الضخم.

يجب أن يوضع في الاعتبار على الدّوام عند مناقشة التركيب الكيميائي للكتلة الحيوية، أنّ الرسوبيات لا تحتوي على صورة حقيقية للعدد الكلّي للمتعضّيات الأصل الموجودة في العمود المائي. بالإضافة إلى ذلك، فإنّ التركيب الكيميائي لهذه المتعضّيات يتغيّر قبل الاندماج في الرّاسب.

بقدر ما تمتلك المكوّنات الكيميائية لهذه المتعضّيات من أهمية، فإن الكائنات الحيّة بمجملها تتركّب بشكل رئيس من نفس مجموعات المكوّنات الكيميائية (البروتينات، اللبيّيات، الكربوهيدرات والليغنين في النباتات العليا).

٤-٦-الوحدات البنائية الأساسية للمادة العضوية:

تشكّل كل الأشياء الحية من عدد غير محدود وبسيط من الوحدات البنائية الجزيئية (*Molecular building blocks*)، التي تحتوي على كميات متنوعة بشكل كبير من الكربون، الأكسجين، النيتروجين والكبريت، وهو ما يجعل نسبة مشاركة المواد العضوية في تكوين النفط أو الغاز أو الفحم تختلف بين مادة وأخرى. تتكون الوحدات البنائية الرئيسة للحياة من كل من الكربوهيدرات والبروتينات والليدات واللغنين.

نتيجةً لكون الكربوهيدرات مكونة فقط من الكربون والهيدروجين، فإنّ أفضل الكيروجين هو الذي يحوي على هيدروجين أكثر وأكسجين أقل. يتخرّب البروتين ومعظم الغلوسيدات في طور الدياتينيز الأولي (ما عدا السيلولوز مثلاً الذي لا يقاوم). يمكننا القول، في تقريب أولي أنّ المكونات المشتقة من مكونات لبيدية، من اللغنين (الخشيين) ومن السيلولوز الأكثر مقاومة سوف تُحفظ إذاً بشكل أفضل وستتركز في البيئات الحطامية (وخاصة الدلتاوية).

إنّ النباتات العليا مسؤولة عن وجود هيمنة لمادة ليغنو - سيلولوزية (بقايا أخشاب مثلاً) ومن هنا يأتي الغنى بالأكسجين والفقر بقيم النسبة الذرية لـ $\frac{H}{C}$ التي تقود إلى مادة عضوية ذات مواصفات بترولية أقل جودة بالمقارنة مع تلك المشتقة من مادة طحليّة (فوتوبلانكتون) أو بكتيرية. هذه الأخيرة في الحقيقة خالية من اللغنين، وكثير من الطّحالب أفقر بكثير بالسيلولوز.

٤-٦-١-البروتينات والكربوهيدرات:

البروتينات عبارة عن جزيئات ضخمة (بوليمرات) غاية في التنظيم، تتركّب من وحدات بنائية أصغر هي الحموض الأمينية. وتمثّل البروتينات معظم مركّبات النيتروجين في الكائنات الحية، وتُشكّل أنواعاً مختلفة من المواد مثل ألياف العضلات، الحرير والإسفنج.

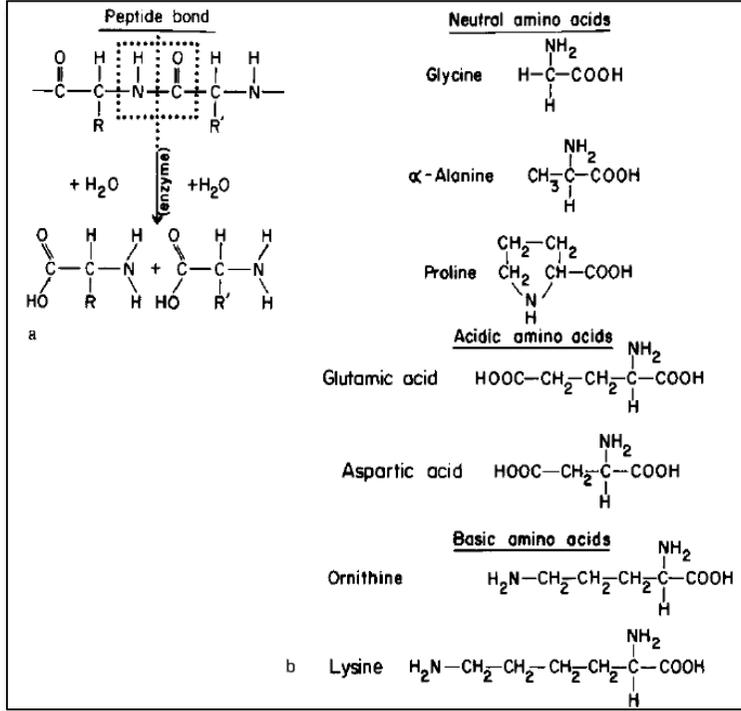
عندما تكون البروتينات على شكل أنزيمات فإنّها تُحفّز تفاعلات بيوكيميائية ضمن الخلايا وخارجها. إنّها ذات أهمية خاصة في عمليات التمعدن الحيوية مثل تشكيل الأصداف، حيث تعمل كملاط عضوي ما بين الخلايا وبالتالي فهي ترتبط ارتباطاً وثيقاً مع الطور الفلزي.

في حال وجود الماء، تتحلّم البروتينات غير الذوّابة - نظراً لعمل الأنزيمات- إلى مونوميرات قابلة للذوبان في الماء هي الحموض الأمينية. تظهر في الشكل (٤-٨) عملية إمارة الرابطة الببتيدية (التحلّل المائي للبروتين) (a) مع بعض الأمثلة البنوية للحموض الأمينية (b).

الكربوهيدرات هو مصطلح شامل للسكريّات الأحادية وبوليمراتها، فهي تشمل السكريّات الأحادية، الثنائية، الثلاثية (أوليغوساكاريدات) والسكريّات المتعدّدة. إنّ كلمة كربوهيدرات مشتقة من

الصيغة التجريبية $C_n(H_2O)_n$ التي تبين وجود كربون مائي، ومع ذلك، فإنه ليس من أهمية كيميائية معينة لهذه الصيغة، لأن الكربوهيدرات في الواقع هي عبارة عن مركبات متعدّدة الهيدروكسيل وليس مُجرّد مواد كربونية مائية.

إنّ الكربوهيدرات هي من بين المكوّنات الأكثر وفرة في النباتات والحيوانات. إنّها مصادر للطاقة وتشكّل الأنسجة الداعمة في النباتات وبعض الحيوانات.



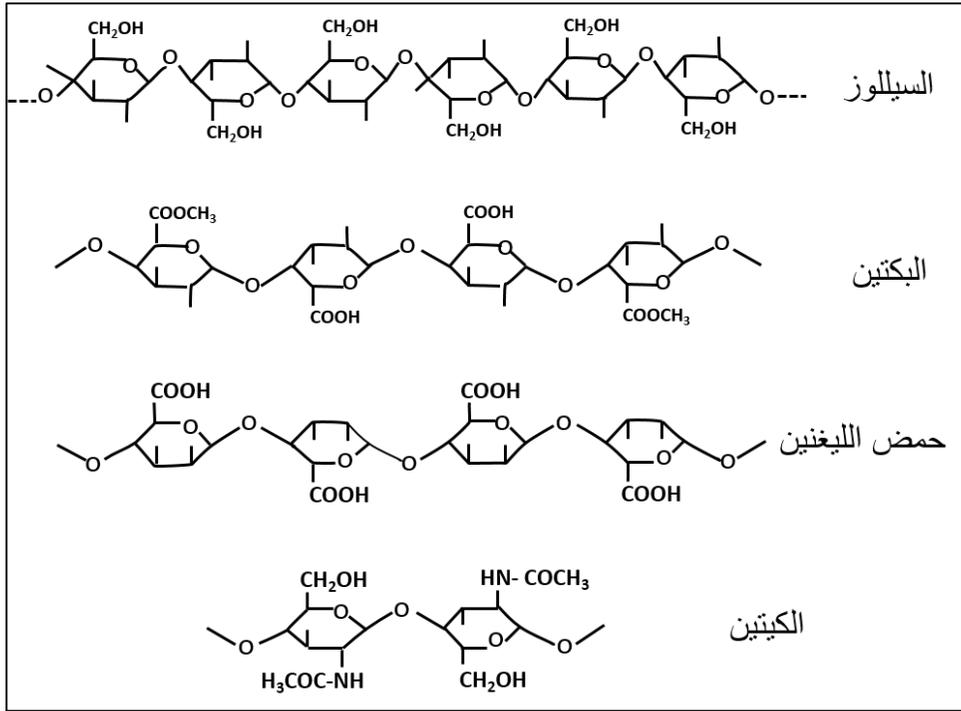
الشكل ٤-٨: (a) عملية إماهة الرابطة الببتيدية (التحلل المائي للبروتين) (b) أمثلة بنيوية لبعض الحموض الأمينية الحيدائية، الحامضية والأساسية الموجودة في البيئات الجيولوجية.

يعدّ السيللوز والكتين من أبرز السكريات المتعدّدة الموجودة في الطبيعة. يتكوّن السكر المتعدّد السيللوزي من 2000 ← 8000 وحدة سكر أحادي (أحادي سكاريد). يتكوّن الخشب من السيللوز بنسبة (٤٠ - ٦٠%) والليغنين.

تُصنّع النباتات العليا الكميّة الأكبر من السيللوز في حين يبدو أنّ بعض الطحالب والأعشاب البحرية والمشطورات مجرّدة من السيللوز. يتكوّن السيللوز والكتين من هيكل متماثل يتألّف بشكل أساسي من وحدات الغلوكوز والغلوكوسامين بالترتيب (شكل ٤-٩).

يحتوي بعض الطحالب - وخاصة الطحالب البنية (*Phaeophyta*) - على ما يصل إلى 40% (بالوزن الجاف) من حمض الليغنين، وهو مشتق من الكربوهيدرات.

يعدّ البكتين وهو من الكربوهيدرات الشبيهة بحمض الليغنين، متعدّد اليورونيد، عنصراً شائعاً في البكتيريا والنباتات العليا (شكل ٤-٩).



الشكل ٤-٩: جزيئات السكريات الضخمة المشتقة والمتمثلة بـ (سيللوز، بكتين، حمض الليغنين والكيتين) تساهم في تشكيل الأنسجة الداعمة في النباتات والحيوانات (الخطوط العمودية في الصيغة تمثل مجموعات الهيدروكسيل OH⁻).

تعدّ السكريات المتعدّدة من المواد غير القابلة للذوبان في الماء إلى حدّ كبير، غير أنّها يمكن أن تتحوّل عن طريق التحلّل المائي إلى جزيئات C₅ و C₆ (سكريات أصغر قابلة للذوبان في الماء).

٤-٦-٢- اللبيدات:

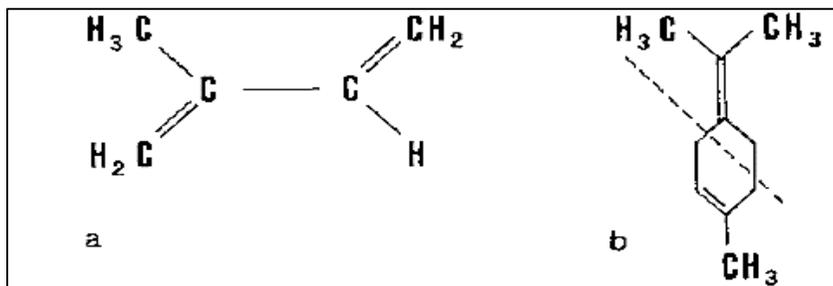
إنّ مصطلح اللبيدات، كما عرّفه بيرغمان 1963، يطلق على جميع المنتجات الحيّة غير القابلة للذوبان في الماء عملياً ولكنّها قابلة للاستخلاص بطريقة أو بأخرى، بما يسمّى المحلّات. تتضمّن هذه المحلّات الكلوروفورم، رباعي كلور الكربون، الإيتر، الهيدروكربونات العطرية والأليفاتية والأسيتون.

تشمل اللبيدات كل من المواد الدهنية (مثل الدهون الحيوانية والزيت النباتية)، والشموع (كتلك التي تظهر كأغشية سطحية للأوراق). تُستخدّم الدهون كمُدخّرات طاقة للمتعضّيات، بينما تُصنّف وظائف المواد الشمعية في المقام الأوّل كوظائف حماية.

إنّ الدهون التي تظهر بشكل طبيعي هي عبارة عن مزيج متعدّد من الغليسيريدات الثلاثية التي يمكن تصنيفها كيميائياً إلى أسترات. يمكن أن تتحلّل الغليسيريدات - عادةً بوجود هيدروكسيد الصوديوم المائي - لإعطاء الغليسرول والحموض الدهنية المكوّنة، والتي نحصل عليها كأملح صوديوم (الشكل ٤-١٠ a). تملك الحموض الدهنية الموجودة في الدهون الطبيعية عدداً زوجياً من ذرات الكربون لأنّه يتمّ تصنيعها بيوكيميائياً من وحدات C_2 (وحدة خلّات). معظم هذه الحموض الدهنيّة تكون بشكل C_{16} و C_{18} (حموض ذات 16 ذرة كربون وحموض ذات 18 ذرة كربون)، بشكل خاص حمض النخيل وحمض الشمع بالترتيب (الشكل ٤-١٠ b). إنّ الحموض الدهنية غير المشبعة شائعة (الشكل ٤-١٠ c).

الشموع الطبيعية مثل شمع النحل، وشموع النباتات هي عبارة عن مزيج من مكُونات مختلفة. تختلف الشموع عن الدهون في أنّ الدّهون مشتقة من الغليسرول، بينما الشموع تشتق من كحولات مُعقّدة طويلة السلسلة (C_{16} حتى C_{36}). غالباً ما توجد مثل هذه الكحولات الطويلة مع كمّيات كبيرة من الحموض التي تكون أيضاً ذات سلسلة طويلة من (C_{24} حتى C_{36}). تحتوي المواد الشمعية النباتية أيضاً على هيدروكربونات، وخاصة ألكانات نظامية طويلة السلسلة مع سيطرة الجزيئات ذات أعداد الكربون الفردية.

بالإضافة إلى هذه اللبيدات النمطية، هناك عدد من أشباه اللبيدات مثل طبقات زيت النفط القابل للذوبان، التربينات، الستيروئيدات والعديد من اللبيدات المعقّدة مثل بعض الفوسفوليبيدات (شحوم فوسفورية). الوحدة الأساسية في العديد من هذه المكُونات هي الإيزوبرين الذي يتكوّن من 5 ذرات كربون (الشكل ٤-١١).



الشكل ٤-١١: (a) وحدة الإيزوبرين، وهي تُمثّل حجر الأساس في العديد من المكُونات الحيوية الطبيعية مثل الستيروئيدات، التربينات والكاروتينات. (b) التربينولين، وهو أحادي ترين حلقي يوجد في الطبيعة ويتألف من وحدتي إيزوبرين.

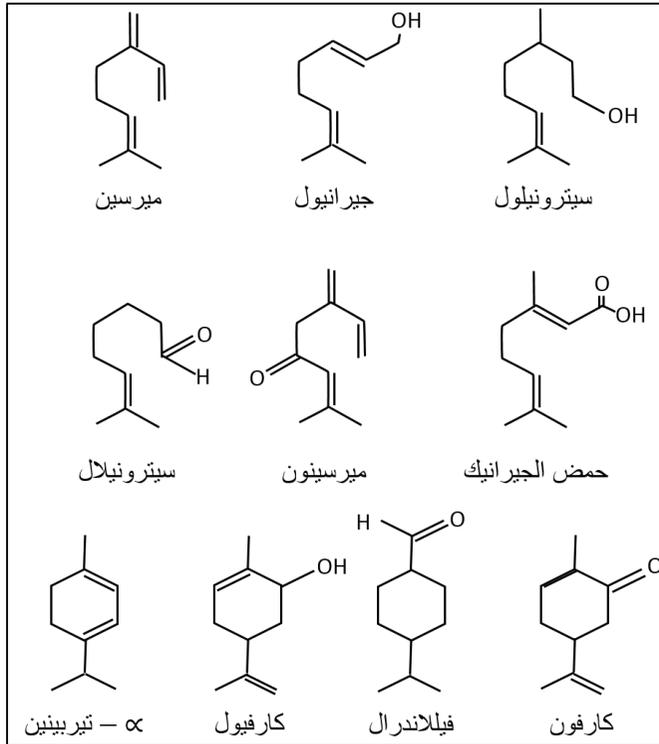
بسبب الروابط الثنائية المترافقة في الإيزوبرين، فإنّه يتبلّر ليشكّل سلاسل وحلقات، ومن المعروف أنّ مجموعة كبيرة ومتنوعة من مركّبات الإيزوبرين ذات السلاسل أو الحلقات موجودة في النباتات والحيوانات. لم يتمّ العثور على مونومير إيزوبرين مفرد في الطبيعة لفترة طويلة. ولكن، تمّ اكتشافه مؤخراً بكمّيات صغيرة في بعض النباتات، إنّه هيدروكربون سريع التطاير ونشط.

يُطلق على الجزيئات التي تحتوي على **وحدتين** إيزوبرين بالتربينات **الأحادية** C_{10} . والجزيئات التي تحتوي على **ثلاث** وحدات إيزوبرين **بالسيكوتربينات** C_{15} . والجزيئات التي تحتوي على **أربع** وحدات إيزوبرين بالتربينات **الثنائية** C_{20} . أما الجزيئات التي تحتوي على **ست** وحدات إيزوبرين فتسمّى بالتربينات **الثلاثية** C_{30} . والجزيئات التي تحتوي على **ثمانية** وحدات إيزوبرين فتسمّى بالتربينات **الرباعية** C_{40} .

تُعدّ الراتنجيات الطبيعية مثل المطّاط والمواد الصمغية، والتي تُنتج من قبل أنواع محدّدة من النباتات العليا (بشكل خاص عائلة *Euphorbiaceae* ذات الفلقتين المزهرة و *Sapotaceae*) بولي تريينات. كما يوجد مؤشّرات (وفق *Brook* و *Shaw*) على أنّ السبوروبولينات (وهي عنصر هام في الأبواغ وغبار الطلع) عبارة عن بولي تريين.

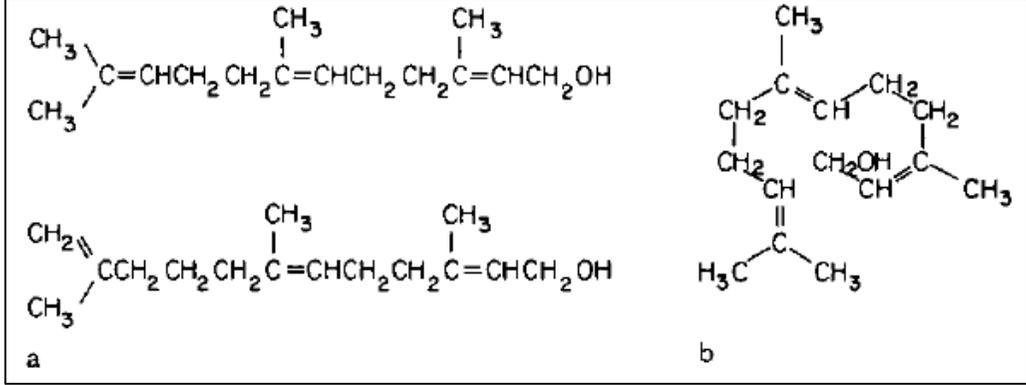
قد توجد الأنماط المختلفة من التريينات ومركّبات الإيزوبرين، إمّا على شكل سلاسل خطّية من وحدات الإيزوبرين أو على شكل حلقات تتراوح من 1 إلى 5 حلقة. يمكن أن توجد التريينات على شكل هيدروكربونات، كحولات، أسترات، ألدهيدات، كيتونات، حموض ولاكتونات. أي أنّها تُظهر درجات مختلفة من الإشباع.

توجد التريينات الأحاديّة C_{10} بكثرة في النباتات العليا والطحالب، وتعتبر كمركّبات غير مستقرّة أيضاً (*Francis 1971*). ومن الجدير بالذّكر أنّ التريينات الأحاديّة تعتبر غنيّة بالزيوت العطرية، وخاصة تلك الموجودة في المناخ الجاف. كمثال على هذه الزيوت: زيت الورد الذي يتألف بشكل رئيسي من الجيرانول والستيرونيلول. إنّ البنى الكيميائية في هذه التريينات الأحادية وغيرها والموجود في أطوار أكسدة مختلفة معطاة في الشكل (٤-١٢). بالإضافة إلى كون هذه الزيوت مشتقة من النباتات، فإنها تتشكل أيضاً من قبل أنواع محددة من غير الفقاريات (العنكبوت، سرطان البحر، حشرات).



الشكل ٤-١٢: أمثلة على التريينات الأحادية، بشكل رئيس تلك الموجودة في الزيوت العطرية لبعض النباتات العالية.

أما السيسكوتربينات (C_{15}) المؤلفة من ثلاث وحدات ايزوبرين فإنها تتمثل بمركب الفارينزول وهو مركب كحولي لا حلقي قائم على ثلاث وحدات من الايزوبرين (الشكل ٤-١٣)، وكلّ من هذا المركب والأوليفين المطابق له (فارنيزين) يوجدان في العديد من النباتات.



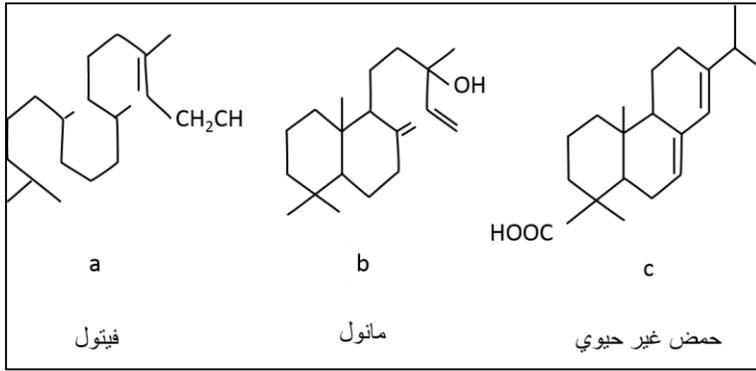
الشكل ٤-١٣ (a & b): أمثلة هيكلية عن السيسكوتربينات، الفارنيزول كمثال شائع عن الكحولات الإيزوبرينية الموجودة في النباتات العالية والبكتريا (في الصيغة وضّحت الروابط). (a) إيزوميرات طبيعية للفارنيزول. (b) الفارنيزول كنموذج وحجر أساس للسيسكوتربينات ثنائية الحلقة.

إنّ الفارينزول مركّب واسع الانتشار ولكنه لا يوجد إلا بتراكيز صغيرة جداً. تحدث، في بعض البكتريا، أسترة بين الكلوروفيل والفارنيزول بدلاً من الفيتول (الشكل ١-٢).

تُعدّ المركبات المحتوية على هيكل من نموذج الفارنيزول مواداً كيميائية حيوية لسيسكوتربينات حلقة دورية، ومن المرجّح أنّ مركبات السيسكوتربينات تنجز تعليمات هرمونية كما يحدث في الغالب في المواد النباتية.

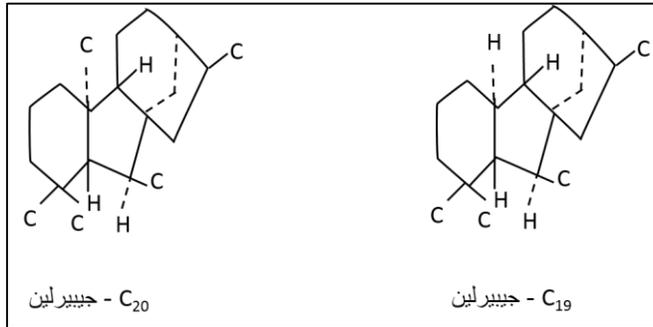
أما التربينات الثنائية فهي تعدّ مكونات شائعة في النباتات العليا (المتقدّمة) وهي تتشكّل الجزء الرئيس من الراتنجات ولاسيّما في الصنوبريات. توجد التربينات الثنائية في الراتنجات مع مشتقات بروبان فينيل كما في الكحول الصنوبري (الشكل ٤-٢٢ a)، كما سنرى فإنّ الكحول الصنوبري يُعدّ مكوناً رئيساً في الليعنين.

تُظهر معظم التربينات الثنائية على شكل تراكيب حلقة ذات حلقتين أو ثلاث حلقات (الشكل ٤-١٤). يُعدّ الفيتول الأكثر أهمية من بين جميع مركبات التربينات الثنائية غير الحلقية (الشكل ٤-١٤ a). إنّه جزء هام من جزيء الكلوروفيل الوفير.



الشكل ٤-١٤ (c-a): صيغ هيكلية لترينيات ثنائية: a- غير حلقيّة، b- ثنائية الحلقة، c- ثلاثية الحلقة. التريينات الثنائية مكونات شائعة في النباتات العليا.

تتأثر العديد من مراحل النمو وتطور النباتات بما يسمى (جيبيرلين) (الشكل ٤-١٥) الذي يُمكن أن نصنّفه ضمن مجموعة التريينات ثنائية الحلقة، وهي توجد عادة بكميات صغيرة في جميع النباتات المتطورة.

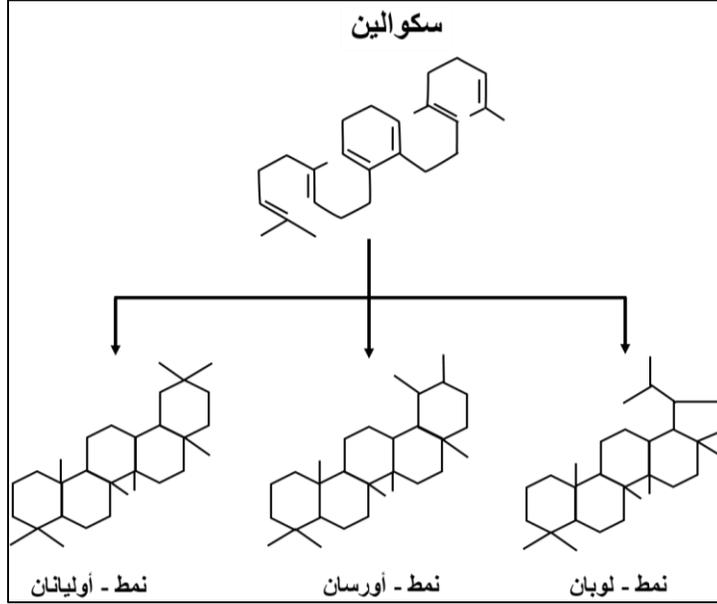


الشكل ٤-١٥: صيغ بنائية لمركب الجيبيرلين الموجود بكميات صغيرة في النباتات العليا.

تُعدّ التريينات الثلاثية، بالمقارنة مع الستيرويدات، مركبات أكثر شيوعاً في النباتات العليا. بينما تكون الستيرويدات كثيرة الوفرة في كلّ من المملكة النباتية والحيوانية.

يُعدّ السكوالين السلف البيوكيميائي المشترك لمختلف التريينات الثلاثية ($C_{30}H_{50}$)، والسكوالين هو هيدروكربون متعدّد غير مشبع يوجد بشكلٍ شائع في أنسجة النباتات والحيوانات (الشكل ٤-١٦)، وتمّ عزله لأول مرة من قبل العالم *Tsujimoto* من الجزء غير المتصّبّن من زيت الكبد من مختلف أسماك القرش.

وجد السكوالين، بعد ذلك، بكميات مختلفة (أحياناً بتركيزات عدة في المئة) في المادة غير القابلة للتصبن في معظم المتعضيات التي تم تحليلها للكشف عن وجودها. يعطى مخطط الأصل لأنواع الأكثر أهمية من التربينات خماسية الحلقة (يورسين، أولينان، ليوبان) من السكوالين في الشكل (١٦-٤).

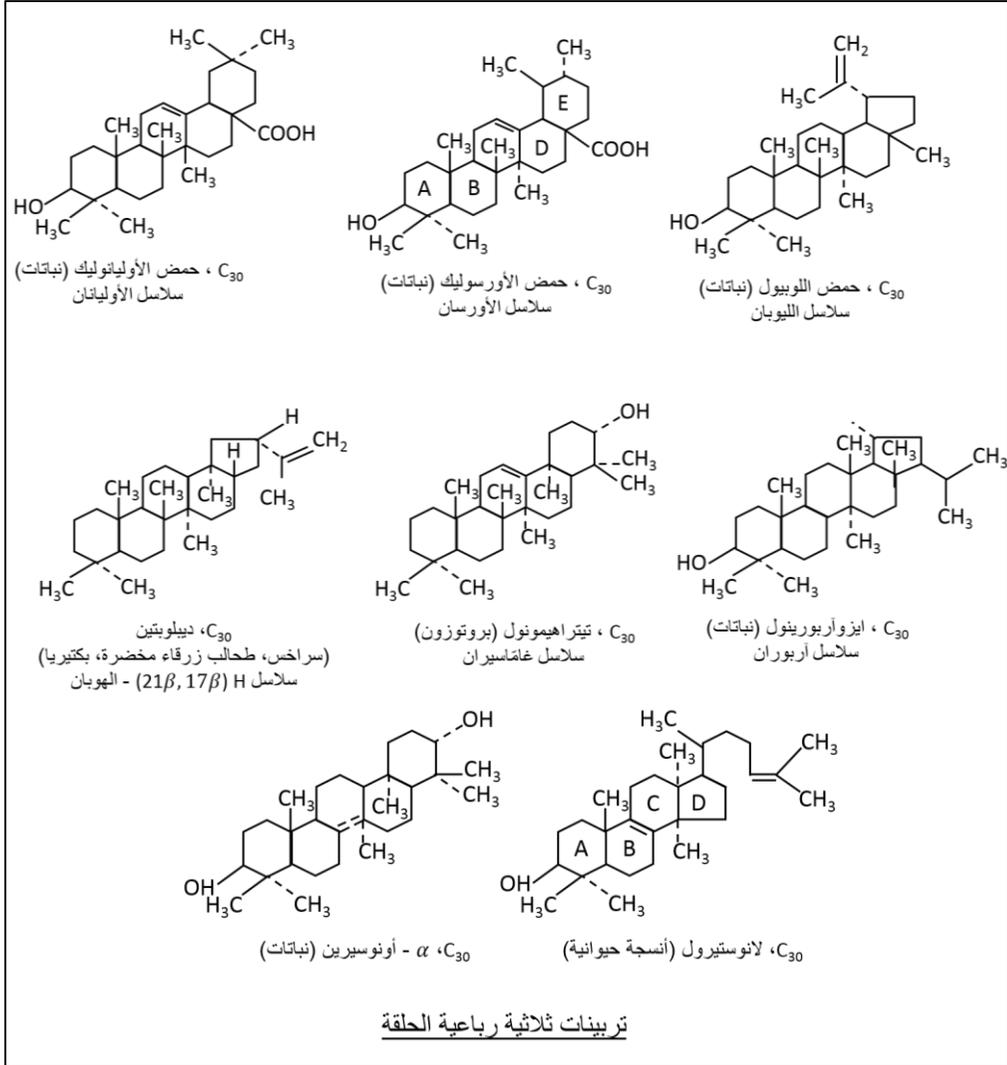


الشكل ١٦-٤: صيغة السكوالين والأصل لمعظم النماذج المهمة من التربينات الثلاثية خماسية الحلقة. يوجد السكوالين بكميات كبيرة نسبياً في معظم المتعضيات.

نجد عدداً من التربينات الثلاثية السائدة في المتعضيات التي تعتبر كالأسلاف المباشرة للهيدروكربونات في الرواسب المتحجرة والبترو (الشكل ١٧-٤). بالرغم من أن التربينويدات الثلاثية المختلفة متوفرة جداً في النباتات العليا، إلا أنه ينبغي التأكيد على أن نوعاً واحداً منها، سلاسل الهويان (شكل ١٧-٤) وجد بتركيز كبير نسبياً في البكتريا والطحلب الأزرق المخضر. تقتصر التربينات الثلاثية الأخرى وخاصة تلك التي تملك خمس إلى ست حلقات، إلى حد كبير على النباتات العليا.

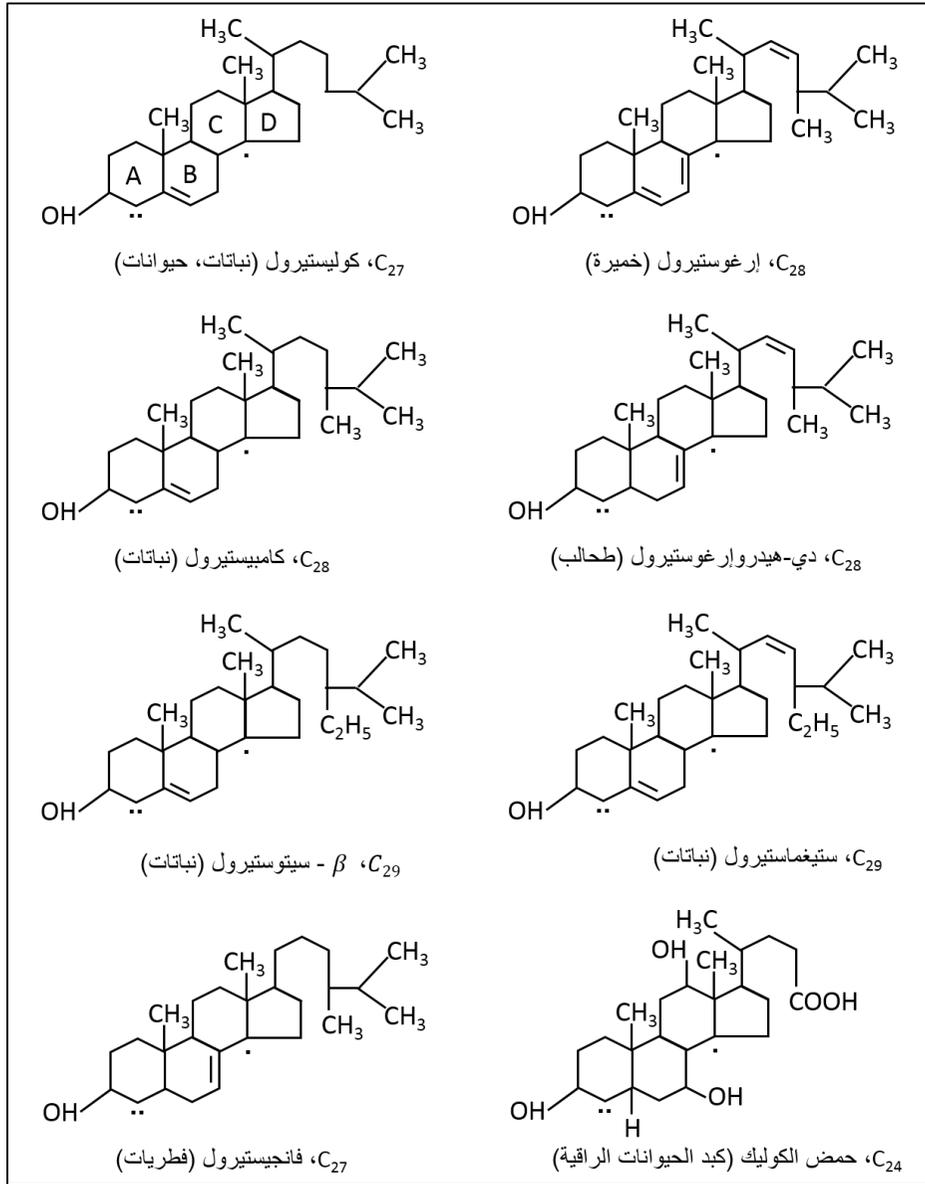
تُعدّل التربينات رباعية الحلقة اللانستيرون ومشتقاتها عادةً، كالتربينات الأخرى بيوكيميائياً، عن طريق إضافة مجموعات الميثيل أو خسارتها. تؤدي خسارة مجموعات الميثيل إلى مجموعات هامة تسمى الستيروئيدات. وجدت هذه الستيروئيدات في جميع أنواع المملكة النباتية والحيوانية.

إنّ الستيروئيدات نادرة، لكنها ليست غائبة، في البكتريا والطحالب الخضراء المزرقة. ليس من الواضح تماماً حتى الآن فيما إذا كانت هذه الكائنات عديمات النوى تصنع الستيروئيدات بنفسها، أو أنّها تحتوي عليها لأنها تستهلكها مع طعامها حين كانت تعيش بشكل غير ذاتي التغذية.



الشكل ٤-١٧: التربينات الثلاثية البارزة من المتعضيات كالأسلاف المستحاثية للتربينويدات الثلاثية.

ترد بعض الأمثلة للستيروئيدات الشائعة في الشكل (٤-١٨). (تُعَلَّم المواقع التي تم نزع مجموعات الميثيل منها بنقاط).



الشكل ٤-١٨: أمثلة بنيوية عن الستيرويدات الشائعة. عُلمت المواقع التي فُقدت فيها مجموعة ميتيل بنقاط (.)

إنَّ الكولستيرول (C₂₇) هو كميّاً ستيروول الحيوانات الأكثر أهمية، وقد وجد أيضاً في العديد من المتعضيات الأخرى حتى في البكتريا. الأرجوستيرول (C₂₈) هو الأكثر توافراً في الخميرة والفطريات الأخرى، ولكن اكتشف أيضاً في بعض الطحالب.

الفاكوستيروول (C₂₉) شائع جداً في المشطورات وأنواع مختلفة من الطحالب مثل *Phaeophyceae*، *Chrysophyceae* وخصوصاً *Phodophyceae*.

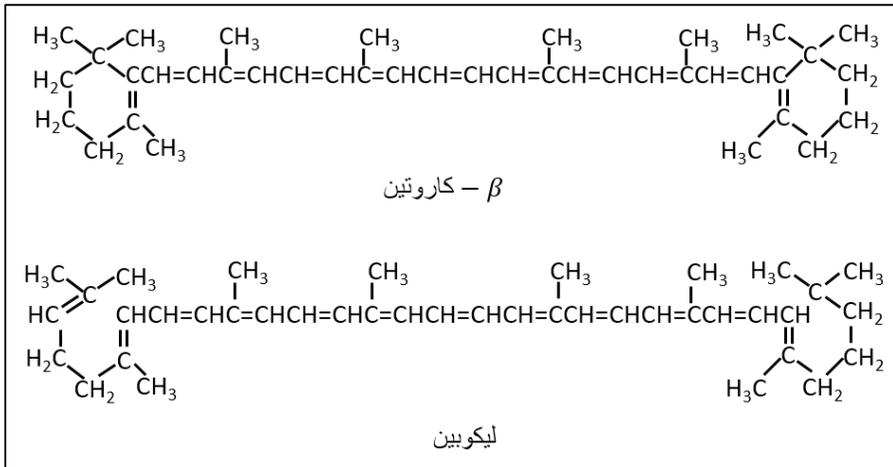
الكامبيسترول (C₂₈) يوجد في مختلف النباتات العليا، السيتوستيرول (C₂₉) والستغماستيرول (C₂₉) نموذجيان، ومتوافران جداً، في النباتات العليا.

لا يمكن تمييز الستيروولات التي تملك نفس رقم الكربون والترتيب البنوي، كالفاكوستيروول، سيتوستيرول والستغماستيرول (كل الستيرويدات التي تملك 29 ذرة كربون (C₂₉)) منذ أن تحوّلت إلى ستيروينات مشبعة. يبدو أنّ المصدر الأكبر للستيروولات على الأرض في الوقت الحاضر هو الطحالب من العوالق النباتية.

الأصبغة الكاروتينية هي الممثل الأكثر أهمية لمجموعة التربينات الرباعية (C₄.)، وهي تُصنّف من ثماني وحدات أيزوبرين. يوجد تشكيلة كبيرة من الأصبغة الكاروتينية في الطبيعة. بسبب التشابه في بنية هذه المجموعة سُمّيت باسم العضو الأكثر شيوعاً فيها وهو الكاروتين.

الكاروتين هو هيدروكربون متعدد غير مشبع يتألف من وحدات أيزوبرين. المجموعات الحاوية على أكسجين من هذا النمط ندعوها كسانتوفيلات. تكون الكاروتينات عادة باللون الأحمر أو الأصفر وذلك بسبب الرقم الكبير للروابط المزدوجة المترافقة في جزيئاتها.

يُظهر (الشكل ٤-١٩) أمثلة بنيوية للكاروتينات مثل الليكوبين وβ-كاروتين التي تظهر عند النباتات. إنّ الكاروتينات متوفرة في الطحالب، تصل تراكيزها، غالباً، إلى حوالي 0.2 % إلى 0.8 % (وزن جاف).



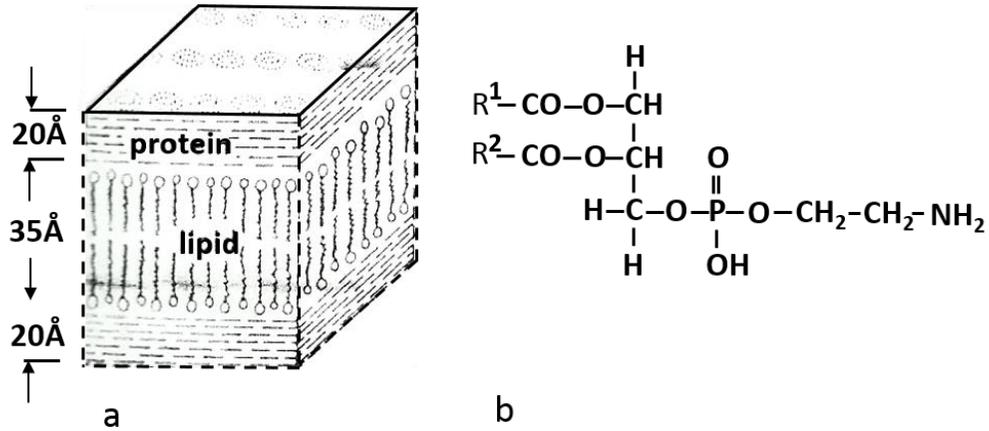
الشكل ٤-١٩: تراكيب أهم الكاروتينات، الليكوبين وβ-كاروتين الليكوبين، C₄₀H₅₆ هي أصبغة حمراء كالبندورة والعديد من الفواكه. وβ-كاروتين C₄₀H₅₆ هي واحدة من عدة أيزوميرات موجودة في النباتات الدنيا والعليا.

يمكن أن ترتفع التراكيز في بعض الأصناف إلى ٥ % أو أكثر. تتركز الكاروتينات في أجزاء معينة من النباتات العليا كما في الثمار والأوراق. مجموعة هامة أخرى من الأصبغة، ذوابة في الزيت وتحمل سلسلة أيزوبرين، هي مشتقات الكلوروفيل. يتركز الكلوروفيل في أقسام النبات حيث يحدث التمثيل الضوئي (الفصل الأول). يُسجّل أنّ متوسط محتوى الكلوروفيل في الطحالب وأوراق النباتات العليا يتراوح من 0.2% إلى 1% (وزن جاف).

يمكن أن يعدّ الكلوروفيل مشتقاً من نواة البورفين. تتكوّن هذه البنية من أربع حلقات بيرول ترتبط مع بعضها بجسور ميثيلية (الشكل ١-٢٠b). البترول البورفيريني هو أيضاً مشتق من نواة البورفين أي من الكلوروفيل.

تشكّل الفوسفوليبيدات (شحوم فوسفورية) جزءاً متكاملاً وهاماً كميّاً من أغشية عدّة في كلّ مستويات التطور. وتتركز أيضاً في أنسجة الحيوانات الأكثر نشاطاً (كبد، كلية... الخ) ويتكوّن العديد من الأغشية من فوسفوليبيدات - بروتينية مزدوجة الطبقات.

يُظهر الشكل (٤-٢٠a) الرسوم التخطيطية للهندسة المعمارية للأغشية. تختلف من فوسفوليبيدات كيميائياً عن الدهون البسيطة التي تحتوي تجمعات لحمض الفوسفوريك، وتزوجين أساسي بشكل متكرر، إضافةً إلى مكونات الحموض الدهنية (الشكل ٤-٢٠b).



الشكل ٤-٢٠: (a) مثال عن هندسة الأغشية المؤلفة من طبقات مزدوجة من بروتين فوسفوليبيد. إن الأغشية مطلوبة على جميع مستويات التطور. خاصة الكائنات البدائية كالبكتريا التي تتألف من امتداد كبير من المادة الغشائية. (b) مثال لتركيب الفوسفوليبيدات (α -سيفالين، R_1 ، R_2 هي هيدروكربونات).

يلعب السيوبرين والكوتين دوراً هاماً في وقاية أنسجة النباتات مثل القشرة المتصلبة، الفلين، وجدران الأبواغ. يتوضع الكوتين والشموع بشكل رئيس في الجانب الخارجي من خلايا النبات، أي على السطح، بينما يتشكل السيوبرين ويتوضع داخل أنسجة النبات والجدران الخلوية.

يعمل السيوبرين والكوتين كحماية من التبخر وتعزيز النثم الجروح. إنها كالشموع، مواد غير متجانسة، وهي مترافقة مع الليغنين، التانين، مركبات ذات سلاسل أليفاتية طويلة (كالكحولات) ومع التربينات. السيوبرين والكوتين مقاومان جداً للهجوم الميكروبي أو الأنزيمي، الأكسدة، والعلاج الكيميائي. إنها تتألف بشكل رئيس من بني بوليمرية وذات ترابط متصالب من الحموض الدهنية والكحولات.

تلعب الحموض ثنائية الكربوكسيل والهيدروكسيلية مع 12 إلى 26 ذرة كربون دوراً هاماً بين مكونات السيوبرين. يبدو أنّ الكوتين هو مزيج من حموض هيدروكسيلية ذات روابط متصالبة عالية مع هيمنة ل 16، 18 و ٢٦ ذرة كربون. تحوي قشرة النباتات من 50% إلى 90% كوتين.

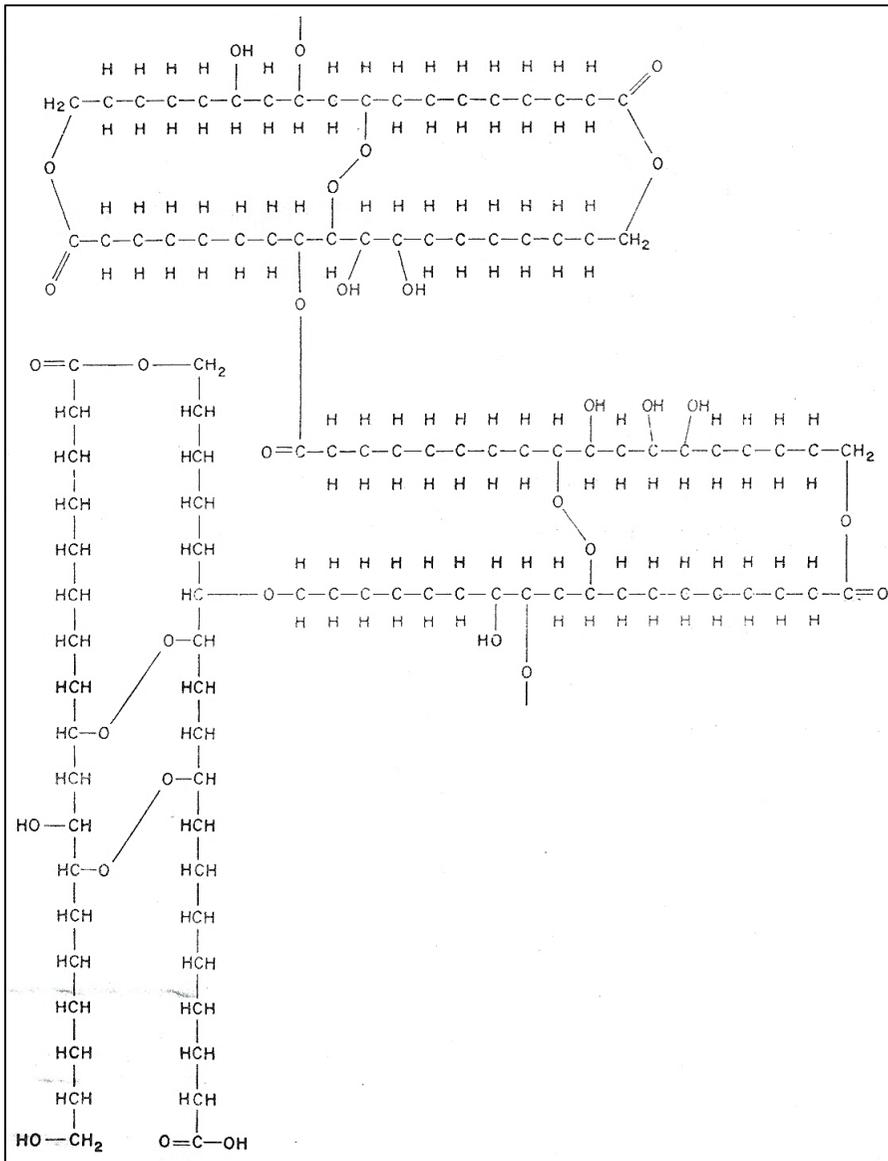
إنّ البنى الكيميائية المفضلة للسيوبرين والكوتين غير معروفة بعد. اقترح *Matic* نموذجاً للكوتين مع أسترة بين الجزيئات بشكل عشوائي إلى حدّ ما بين الحموض الهيدروكسيلية ومجموعات الكربوكسيل كما هو مبين في (الشكل ٤-٢١).

يبدو أنّ الحموض الهيدروكسيلية النموذجية من الكوتين والسيوبرين توجد فقط في النباتات العليا البرية التي تتراوح من (*Psilopsida*) حتى مغلفات البذور.

٤-٦-٣- الليغنين والتانين:

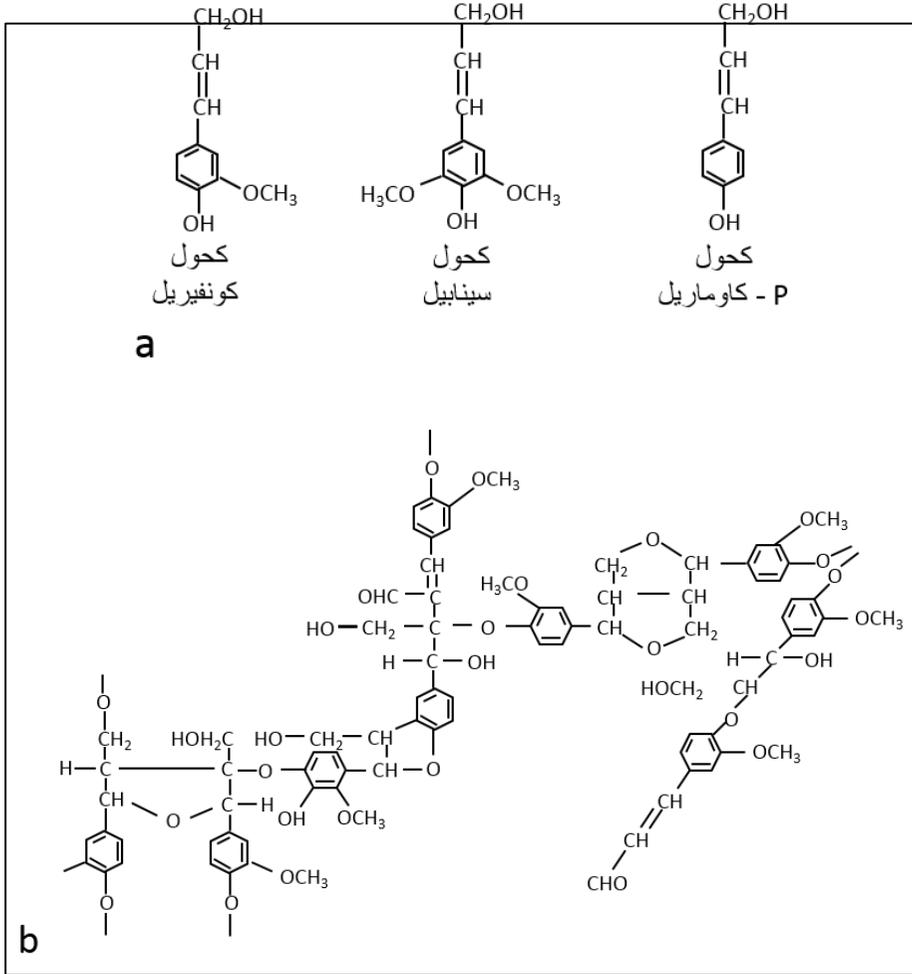
لليغنين والتانين أهمية كبيرة، لما لهما من انتشار ووجود كبير وبالتالي لأهميتهما الحيوكيميائية. يتميز كلّ منهما ببنية العطرية (الفينولية). لا ترکّب المركبات العطرية عادةً في الحيوانات لكنها شائعة جداً في أنسجة النباتات.

تستخلص معظم المتعضيات المركّبة للضوء أنظمة الحلقات العطرية من السكريات الأحادية، بينما يبدو أنّ تركيب البكتريا والفطريات غيرية التغذية من (وحدتين C_2) هو السائد. على كلّ، كلا الطريقتين في التركيب ممكنة. إنّ أسماء الليغنين والتانين هي مصطلحات جماعية ولا تشير بوضوح إلى مواد محدّدة.



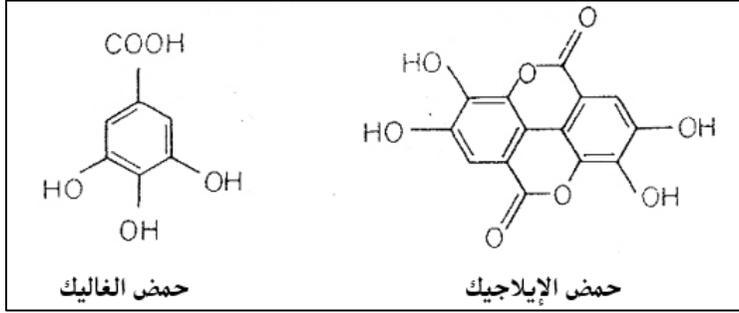
الشكل ٤-٢١: بنية الكوتين. الكوتين يوجد في أنسجة النباتات الواقية. تتألف قشرة النباتات إلى حدٍ كبير من الكوتين وفق *Nichols & Hitchcock*، 1971.

يظهر الليغنين كشبكة ثلاثية الأبعاد تتوضع بين مذيلات السيلولوز للأنسجة الداعمة للنبات. الليغنين أساساً هو بولي فينول ذو وزن جزيئي عالي، يتألف من وحدات مبنية من مشتقات فينيل البروبان. من وجهة نظر تطورية، فقد ظهر الليغنين لأول مرة في المستنقعات. الليغنين النموذجي موجود، على ما يبدو، ويُظهر تمايز النشوء والتطور. يصنع الليغنين في النباتات عن طريق الجفاف وتكاثف الكحولات العطرية مثل كونيفيريل وسينابيل وكحول الكوماريل (الشكل ٤-٢٢). الهيكل التخطيطي لجزء من جزيء الليغنين مبين في (الشكل ٤-٢٢b).



الشكل ٤-٢٢: (a) كحولات النباتات العطرية، اللبنة الأساسية من الليغنين. (b) قسم من جزيء الليغنين. يظهر الليغنين على شكل شبكة ثلاثية الأبعاد بين مذيلات السيلولوز في الأنسجة الداعمة للنباتات وهو وفير جداً في النباتات العليا.

التانين هو كميّاً أقلّ أهمية بكثير من الليغنين، ولكنّه واسع الانتشار. اسمه مشتق من قدرته على دباغة الجلود، إنّه وسطيّ، في التركيب والسلوك، بين الليغنين والسيللوز، وهو يملك مجموعات فينولية وكربوكسيلية في بنيته الذرية. التركيب الكيميائيّ للتانينات متنوّع جدّاً، لكنها جميعاً مشتقات معقّدة من حمض الغاليك أو الإيلاجيك. يظهر التركيب الصيغي لكلا الحمضين في (الشكل ٤-٢٣).



الشكل ٤-٢٣: تراكيب حمضي الغاليك والإيلاجيك. اللبنات الأساسية للتانين.

وجد التانين أساساً في النباتات العليا، لكن أيضاً في الطحالب والفطريات. يتركّز في النباتات العليا بشكل خاص في اللحاء (< 17%) وفي الأوراق (< 6.5%). إلى جانب هذه المركبات الحلقية الهامّة جدّاً كميّاً، هناك سلاسل كاملة من الفينول والحموض العطرية ومشتقاتها التي تظهر خلال المملكة النباتية.

٤-٧- الوجود الكمي والكيفي للمركبات الكيميائية في البكتريا، العوالق

النباتية، العوالق الحيوانية والنباتات العليا:

بالرغم من أنّ جميع المتعضيات تتكوّن من نفس المجموعة من المكونات الكيميائية، فهناك اختلافات هامّة في أنواع المركّبات الكيميائية بين بعض أنواع المتعضيات. على سبيل المثال، يوجد اختلاف كبير بين النباتات البحرية الأكثر بدائية مثل الطحالب العالقة وحيدة الخلية الصغيرة جدّاً، والغالبية العظمى من النباتات الأرضية العليا.

تتألّف المادة الحية للعوالق البحرية بشكل رئيس من البروتين (حتى 50% أو أكثر)، كميّة متغيرة من اللبّيد (عادة بين ٥ و ٢٥%) وكميّة متغيرة من الكربوهيدرات (عادةً ليس أكثر من 40%). يبيّن الجدول (٤-٣) الكميات الوسطية للمكوّنات الكيميائية الرئيسة للعوالق البحرية الشائعة.

الجدول ٤-٣: المكونات الكيميائية الأساسية للعوالق البحرية بالمئة من الوزن الجاف.

رماد	كربوهيدرات	ليبيد	بروتين
30-59%	0-31%	2-10%	24-48%
12-27%	6-36%	2-6%	41-48%
4-6%	0-4%	5-19%	71-77%

تتألف النباتات الأرضية العليا، بما في ذلك الغالبية العظمى من الأشجار، مقارنةً مع هذه الكائنات البحرية الهامة كمياً، إلى حدٍ كبير من السيلولوز (30 إلى 50%) والليغنين (15 إلى 25%). يتم دمج كلا المكونين بشكل رئيس في بنى هيكلية تقوم بوظائف دعم النباتات، وبالتالي لا تحتاجها متعضيات العوالق البحرية. قد يصل محتوى البروتين في النباتات الأرضية العليا إلى 10% لكن معدله 3% أو أقل. في المناقشة التالية، سيتم وصف المعلومة الأساسية حول التركيب الكيميائي للأصناف ذات الصلة من المتعضيات بقدر ما هو متوفر.

إنّ البكتيريا، أكثر المتعضيات بدائية، قابلة للتكيف بشكل كبير، وبالتالي متغيرة نسبياً في تركيبها الكيميائي. إنها تحتوي حوالي 80% ماء أو أكثر، والباقي هو مادة عضوية. تحتوي البكتيريا، على أساس الوزن الجاف، حوالي 50% كربون، 10-15% نتروجين، 2-6% فوسفور، و 1% كبريت.

فيما يتعلق بأنماط المركبات العضوية، تتألف البكتيريا من حوالي 50% بروتين، 20% أغشية و 10% ليبيدات والباقي هو حموض (*Ribonucleic*) و (*Desoxyribonucleic*). تتألف الأغشية من نسبة كبيرة من الليبيدات وأشباه الليبيدات (الجدول ٤-٤).

الجدول ٤-٤: مكونات غشاء البكتريا.

النسبة المئوية لغشاء		نمط المكون العضوي
Micrococcus lysodeikticus	Purple bacteria	
28-37 (9)	40-50 (10-20)	ليبيد (حيادي) (فوسفوليبيد)
(28)	(30)	
50	50	بروتين
15-20	5-30	سكريات متعدّدة

يكون العديد من البكتريا قادراً على تخزين المواد الدسمة، السكريات المتعددة، الفوسفات المتعدّدة والكبريت. وجدت مجموعة متنوعة من الستيرولات مع 27 إلى 29 ذرة كربون، في الجزء الليبيدي من البكتريا. تعود هذه الستيرولات بشكل أساسي إلى أنواع من الكوليستيرول (C₂₇)، أرجيستيرول (C₂₈)، والستيغماستيرول (C₂₉).

وجدت التربينات من سلاسل الهويان، مؤخراً، في البكتيريا (الشكل ٤-١٧). الحموض الدهنية في البكتيريا هي عادة ضمن مجال من C₁₀ إلى C₂₀. يبدو أنّ أكثرها وجوداً الحموض الدهنية المتفرعة على هيئة أيزو أو أنتيزو (مجموعات الميثيل المتفرعة (١ أو ٢ ذرة) على التوالي، من طرف ذرة الكربون) مع أرقام الكربون من 14 إلى 18. تظهر الهيدروكربونات في سلاسل مفتوحة بشكل رئيس مع ١٠ إلى 30 ذرة كربون.

العوالق النباتية، كما أشرنا سابقاً، هي المنتج الأهم للمواد العضوية في البيئة المائية. تم عرض المكونات العضوية الرئيسية لمجموعتين هامتين من الطحالب، هما المشطورات والسوطيات العملاقة (*Dinoflagellates*)، في الجدول (٤-٣).

قد تؤثر الظروف البيئية، مثل درجة حرارة الماء والمواد المغذية، في التركيب الإجمالي من الطحالب أكثر من مختلف الصفوف والأنواع. يُعطى تركيب جزئي للبيد في المشطورات في الجدول (٤-٥). إنّ كمية الحموض الدهنية غير المرتبطة، والتي تتضمن أكثر من نصف كمية جزئي البيد الكلي، مرتفعة جداً نسبياً، خاصة عند مقارنتها بالأنسجة الحيوانية.

الجدول ٤-٥: تركيب الجزئي للبيد في المشطورات.

الحموض الدهنية غير المرتبطة	82-59 %
الحموض الدهنية المرتبطة	17-1 %
الجزء غير القابل للتصبن	29-12 %
الكحول	7-3 %
الهيدروكربونات	14-3 %

يتفاوت توزع الستيرويدات والكاروتينات الرئيسية إلى حدٍ بعيد بين صفوف الطحالب. تحتوي كلوروفيتا (الطحالب الخضراء) بشكلٍ خاص إرغوستيرول، ولكن أيضاً ستيرولات، كالكوليستيرول والفاكوستيروول. الستيروول الرئيس في الرودوفيتا (الطحالب الحمراء) هو الكوليستيروول، بينما يكون الستيروول الرئيس في الفايوفيتا (الطحالب البنية) هو الفاكوستيروول.

قد يرتفع تركيز الستيرويدات في الطحالب إلى 0.3% على أساس الوزن الجاف، أما الكمية النسبية من الكاروتينويدات فتكون أعلى في الفايوفيتا حيث إنّ تركيزها قد يصل إلى ٦ مغ/غ (أي ما يعادل 0.6% من الوزن الجاف).

إنّ معظم الحموض الدهنية الموجودة في الطحالب هي كلها حموض أحادية الكربوكسيل مشبعة أو غير مشبعة مع سلاسل مستقيمة زوجية عدد الكربون تنتمي إلى المجال من C₁₂ إلى C₂₀.

الحموض الدهنية طويلة السلسلة هي المكونات الرئيسية في الدهون المخزونة والدهون القطبية (الشحوم الفوسفورية) في الأغشية الحيوية للطحالب.

عادةً ما تكون الحموض الدهنية المتفرعة من نمط المتماثلة وغير المتماثلة التركيب ومفروقة التركيب، في حال وجودها، مكونات ثانوية في الطحالب، على عكس تركيزها في البكتيريا. إنّ حمض النخيل (C_{16}) وحمض الشمع (C_{18}) مع نظائرهم غير المشبعة مع نفس أرقام الكربون، هي الأكثر وفرة. إنّ الحموض الدهنية المتعددة غير المشبعة أكثر شيوعاً بكثير في الطحالب ممّا هي عليه في النباتات العليا. يتراوح تركيز المواد الهيدروكربونية في الجزء الليبيدي من الطحالب بين 3-5%، إنّها تتكوّن من الهيدروكربونات المشبعة وغير المشبعة التي تملك سلاسل مستقيمة ومتفرّعة على حدّ سواء.

تصنّع الطحالب البحرية الألكانات النظامية ضمن المجال من C_{14} إلى C_{32} . مع أنّ معدّل الأعداد الزوجية إلى الأعداد الفردية في السلاسل المتناظرة في كثير من الأحيان يكون على مقربة من الواحد، إلّا أنّ هناك أمثلة عدّة يكون فيها $n-C_{15}$ أو $n-C_{17}$ أو كليهما، هما الألكانات المسيطران. غالباً ما يمثل هذان الألكانات أكثر من 90% من السلاسل المتناظرة بأكملها.

لوحظ أنّ السلسلة الهيدروكربونية المستقيمة في المركب الأوليفيني بعدد ذرات كربون من 17 إلى 33 موجودة في اثنين من الطحالب هما: بوتريكوس براوني (الطحالب البنية الذهبية)، وأنا سيستيس مونتانا (الطحالب الخضراء المزرقة).

أبدت هذه الهيدروكربونات غلبة للجزيئات الفردية C_{17} ، C_{27} ، C_{29} و C_{31} . المحتوى الكلي من هذه الهيدروكربونات هو بحدود 0.1-0.3% من الوزن الجاف. وجد أنّ المواد الهيدروكربونية المستخرجة من الطحالب البنية-الذهبية هي فقط من مركبين بسلاسل مستقيمة أوليفينية ($C_{34}H_{58}$).

هناك معلومات قليلة نسبياً عن التركيب الكيميائي التفصيلي عن العوالق الحيوانية البارزة، كالمنخربات ومجذافيات الأرجل (جدول 4-3). كون العوالق الحيوانية، وخاصة المجذافيات، تتغذى مباشرة على العوالق النباتية، هناك تشابه ما بين الجزء الليبيدي في العوالق النباتية والعوالق الحيوانية.

تشكل مجذافيات الأرجل أكبر جزيء مفرد في العوالق الحيوانية في معظم المياه. كان الجزء الليبيدي لبعض مجذافيات الأرجل من النمط القارّي مرتفعاً بشكل غير اعتيادي، مع ما يقارب 30% على أساس الوزن الجاف.

أدى تأثير التغذية في الكمية الإجمالية من الدهون والاستنزاف السريع لها في أثناء المجاعات إلى استنتاج مفاده: أنّ الدهون وخاصة استر الشمع يخدم كمخزون احتياطي للطاقة في المجذافيات،

يوضّح الجدول (٤-٦) تركيب الليبيدات في المجذافيات. إنّ أسترات الشمع في الجزء الليبيدي ذات أهمية خاصة لأنّ كلاً من مكوناتها، من الحموض الدهنية والكحول، مكوّن على حدّ سواء من سلاسل طويلة من الهياكل الكربونية مع 18 أو أكثر من ذرات الكربون.

يتراوح إجمالي عدد ذرات الكربون، الكحول بالإضافة للحمض، في استر الشمع بين ٣٠-٤٠. إنّ أسترات الشمع في المجذافيات البحرية هو على الأرجح المصدر الرئيس للكحولات طويلة السلسلة التي لوحظت في الرواسب البحرية وفي ليبيدات سطح المحيط.

الجدول ٤-٦: تركيب الجزء الليبيدي (wt. %) في *calanoid copepods* (مجدافيات الأرجل):

<i>Calanus helgolandicus</i> wild type		<i>Gaussia princeps</i> wild type	الجزء
a	b		
trace	3	trace	الهيدروكربونات
37	30	73	استرات الشمع (متضمنة استرات الستيروول)
5	4	9	جليسيريدات ثلاثية
14	17		ليبيدات قطبية (حموض حرّة، كوليستيرول، جليسيريدات أحادية... الخ)
44	45	17	شحوم فوسفورية
12.4	15	28.9	الليبيدات الكئيّة (الوزن الجاف بالمئة)

وجد أنّ البريستان مكوّن رئيس من المادة الدهنية في المجذافيات، وقد يستعمل للطفو من أجل حفظ الطاقة التي تساعد على الحفاظ على العيش في مكانٍ مناسبٍ في العمود المائي عن طريق السباحة. قد يكون البريستان من مجدافيات الأرجل هو المصدر الرئيس لهذه الهيدروكربونات في البيئة البحرية.

إنّ النباتات العليا الأرضية هي المصدر الرابع للمادة العضوية في الرواسب. تتكوّن مادة النباتات العليا، وخصوصاً الشجيرات والأشجار، كما أُشير سابقاً، بمعظمها من السيلولوز واللغنين (معاً ٥٠-٧٠%). تكون الليبيدات والبروتينات، كمياً، ذات أهمية ثانوية فقط. قد تغطي أجزاء معينة من النباتات العليا مثل اللحماء، الأوراق، الأبواغ، غبار الطلع، البذور والفواكه كثيراً بالليبيدات وأشباه الليبيدات. إنّ الأجزاء النباتية المذكورة ذات مقاومة عالية للتحلل الميكانيكي، الكيميائي والبيوكيميائي، وهذا ما أدى إلى انتشار وتوزّع المواد النباتية الأرضية في الرواسب، وخاصّة الرواسب البحرية.

يتغير محتوى الدهون في البذور والفواكه بشكلٍ كبير بين النباتات المختلفة (حوالي ١-٥٠%)، وبالتالي فإنَّ حساب قيمة المتوسط لا معنى لها. عادةً ما تحتوي حبوب الطلع على (٢-٨%) دهون. تحتوي الأوراق كميات كبيرة من الليبيدات وأشباه الليبيدات (شموع، كوتين، سيوبرين إلخ).

تتصف الليبيدات المشتقة من النباتات العليا بعدد من الخصائص. تُظهر الألكانات النظامية فيها ضمن المجال من C_{10} إلى C_{40} غلبة قوية للأعداد الفردية على الأعداد الزوجية (بمعامل ١٠ أو أكثر). تظهر هذه الغلبة بشكلٍ خاص من $n-C_{23}$ إلى $n-C_{35}$ مع غلبة قوية للألكانات النظامية $n-C_{27}$ ، $n-C_{29}$ و $n-C_{31}$.

إنَّ أدنى وزن جزيئي تحمله النباتات للألكانات النظامية هو n -هبتان (C_7H_{16})، وأعلى هو دوهكساكونتان ($C_{62}H_{126}$). الكحولات الأليفاتية زوجية العدد مع 24 إلى 36 ذرة كربون شائعة نسبياً، وخصوصاً في الشموع النباتية. مكونات نموذجية أخرى من النباتات العليا هي المركبات الفينولية، مثل كحول الصنوبر (الشكل ٤-٢٢a) وغيره.

تكون الحموض الدهنية في النباتات العليا ذات السلاسل المستقيمة المشبعة مع عدد ذرات كربون زوجي في المجال من C_8 إلى C_{26} شائعة جداً. على كلِّ، الحموض الدهنية الأبرز هي حمض النخيل C_{16} وحمض الشمع C_{18} (الشكل ٤-١٠b).

تملك سلسلة الحموض الدهنية المستقيمة الأكثر شيوعاً 14، ١٦، 18، 20 ذرة كربون. مرّة أخرى الحموض مع 18 وبدرجة أقلَّ ١٦ ذرة كربون هي الأكثر شيوعاً. أنواع مختلفة من حموض الهيدروكسي زوجية العدد مع 12 حتى 26 ذرة كربون والنتيجة من تحلل الكوتين والسيوبرين هي أيضاً مساهمات نموذجية من النباتات الأرضية العليا.

يوجد في أوراق الأشجار والفواكه نوعان من الأصبغة (شكل ٤-١٩) يمكن أن تحدث بتركيزات تصل حتى ١%. لوحظت التربينات الأحادية (الشكل ٤-١٤) من بين التربينويدات المبنية من وحدات إيزوبرين (C_5) بكثرة، مثال: في الزيوت الأساسية والراتنجات (الشكل ٤-١٢).

كثيراً ما لوحظ أن استخلاص معظم أنواع التربينات الثلاثية خماسية الحلقة (الشكل ٤-١٧) اقتصر أساساً على النباتات العليا وخاصة على مغلفات البذور. الستيرولات الرئيسية في النباتات العليا هي سيتوستيرول وستيغماستيرول كلاهما مع ٢٩ ذرة كربون، ولكن هذا الأخير يحتوي رابطة ثنائية في السلسلة الأليفاتية الجانبية.

٤-٨- تأثير الوسط في تركيب المادة العضوية:

يعتمد التركيب الكيميائي للكتلة الحيوية في منطقة محدّدة وزمن محدّد، بشكلٍ رئيسٍ على البيئة الفيزيائية والكيميائية للعوائل البيولوجية ومستوى تطور الكائنات الحية. تتضمّن العوامل البيئية كلّ من الضوء، درجة الحرارة، المغذّيات والتيارات المائية. ستكون الشروط في الأجسام المائية العذبة مختلفة تماماً سواء عن الأحواض البحرية المغلقة أو المحيطات المفتوحة.

العوامل البيئية الأكثر أهمية على الأرض هي الشروط المناخية، مورفولوجيا شكل الأرض، ووفرة المواد المغذّية. يُمثّل عامل الزمن، في المعنى الجيولوجي، بالعمر الطبقي، أو بكلماتٍ أخرى، بمستوى تطور الكائنات قيد الدراسة. تنتج تجمّعات طبيعية من النباتات والحيوانات أكثر أو أقلّ نموذجية من اتحادات مختلفة مع عوامل بيئية عبر الزمان والمكان.

كان الجزء الأكبر من الكتلة الحيوية، قبل الديفوني، مكوّناً من البكتريا، الطحالب الزرقاء - المخضرة، والطحالب العليا التي تعيش في البيئة البحرية. يمكن اعتبار فحم الطحالب البريكمبري، المسمّى شنغايت (*shungite*) (بحيرة أونيجا، روسيا) كمثّل للمستحاثات المثال لواحدة من أقدم تجمّعات المتعضيات الطبيعية.

تحمل التجمّعات الطبيعية خلال الكمبري، الأوردوفيسي وحتى في السيلوري بصمة البيئة البحرية وتخلو عملياً من النباتات العليا (انظر أيضاً الفصل ٢). هذا يعني أنّه، من وجهة نظر مستحاثية، لا نتوقّع وجود كمّيّات كبيرة من الليغنين ومشتقّاته في الرّواسب. كذلك لا نتوقّع العثور على أيّ قشور متصلّبة أو شموع نباتية، ونادراً ما نجد أبواغاً، لا حبّات طلع، لا مشطورات ولا منخربات.

من غير المتوقّع، من وجهة نظر الكيمياء البنوية، غلبة فردية واضحة لذرات الكربون بين الألكانات النظامية الأعلى، إذ توجد فقط كمية محدّدة من جزيئات أليفاتية طويلة السلسلة مع أكثر من ٢٥ ذرة كربون. من المتوقع العثور على مجموعة متنوعة من مركّبات الستيروئيد، في حين يتواجد عدد قليل نسبياً وكمّيّات صغيرة جداً من التربينات الثلاثية، باستثناء سلسلة الـ (*hopane*) الموجودة في كلّ مكان تقريباً (الشكل ٤-١٧).

منذ بداية الديفوني تقريباً، أمكن ملاحظة تنوّع أكبر في التجمّعات الطبيعية للمتعضيات. هذا يعود إلى التمايز المتزايد تدريجياً في المملكةين النباتية والحيوانية (الشكل ٢-٢ إلى ٢-٤) وإلى غزو القارات من قبل النباتات.

هناك ارتباط محدود بين السحنات الجيولوجية لوحدة رسوبية معطاة والتجمّعات الطبيعية. إنّه ولعدّة أسباب مجرد تشابه وليس تطابقاً. إلى جانب عامل التطوّر الذي يؤثّر في التجمّعات الطبيعية، هناك عوامل الجغرافيا النباتية والحيوانية والعلاقة المعقّدة المتبادلة في السلسلة الغذائية التي لا تترك، بالضرورة، بصمة على السحنات.

تُعدّ التجمّعات الحيويّة كنواتج فساد أو كإضافات إلى المخزون الأساسي من المتعضيات، الذي تشكّله دائماً العوالق النباتية والبكتريا، لسببين رئيسيين هما: قانون السلسلة الغذائية والأهمية الكميّة للمُنْتِجات الأوليّة مثل العوالق النباتية. يمكن في الرواسب المائية، بصورة عامة، ملاحظة ثلاثة تجمّعات طبيعية بين بقايا المواد العضوية المنتجة بيولوجياً:

(١) بقايا الطحالب والعوالق الحيوانية مع الكائنات الحية الدقيقة (البكتريا بشكل رئيس).

(٢) بقايا النباتات العليا التي تحلّلت بشدة، تأكسدت جزئياً، وأعدت المتعضيات الدقيقة صياغتها بشدّة.

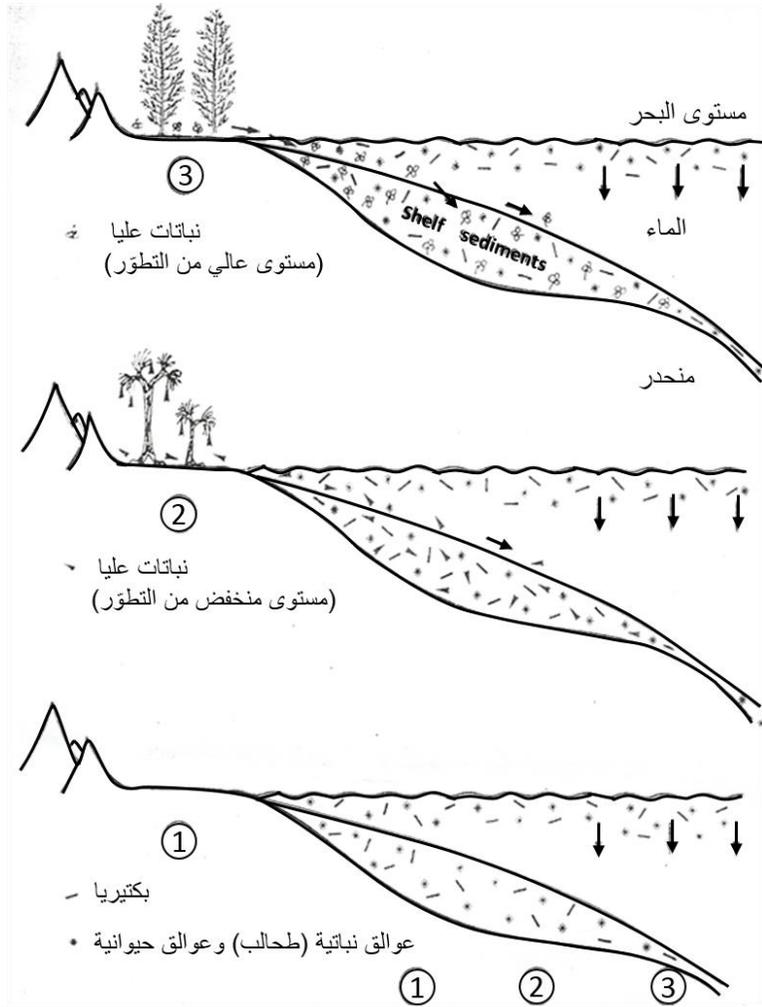
(٣) بقايا النباتات العليا ذات الفساد القليل أو المتوسط.

إنّ الارتباط بين هذه التجمّعات الطبيعية أمرٌ ممكن، طبعاً، خصوصاً بإضافة النباتات الأرضية العليا للرواسب الشاطئية البحرية. ويرد الملخّص التخطيطي للتجمّعات الطبيعية من المادة العضوية خلال التاريخ الجيولوجي في الشكل (٤-٢٤).

حتى الآن هناك معرفة قيّمة قليلة عن الاختلافات في التركيب الكيميائي للكتلة الحيوية الناتجة عن التجمّعات الطبيعية المختلفة. تمّ تسجيل عدد قليل من القيم القصوى في السجّل المستحاثي. يمكن للمساهمات المتفاوتة من النباتات العليا إلى المياه البحرية المتاخمة مع العوالق النباتية والعوالق الحيوانية البكتيرية المكانية، أن تخدم كمثال.

إلى جانب الاختلافات في تركيب نمط اللبيد والهيدروكربون (كالكحول، الشمع، الألكانات)، يمكن ملاحظة تغيّر في التركيب الكيميائي الإجمالي للكتلة الحيويّة أي: تغيّر في النسبة الذريّة H/C. تملك المواد العضوية المستمّدة من الأرض في الغالب، ذات النسبة العالية من الكربوهيدرات واللغنين، النسبة H/C ضمن المجال ١,٣ إلى ١,٥، بينما تصل نسبة H/C في العوالق البحرية المحليّة مع أجزاء بروتينية وليبيديّة كبيرة حوالي ١,٧ إلى ١,٩.

السبب الرئيس لهذا الاختلاف هو أنّ المادة العضوية المستمّدة من الأرض هي أكثر عطرية أو أكثر غنىً بالأكسجين من الكتلة الحيوية للعوالق البحرية.



		①	②	③
التجمعات الطبيعية الرئيسية للمادة العضوية خلال التاريخ الجيولوجي		كمبري-سيلوري	ديفوني-جوراسي	كريتاسي-حديث
بكتيريا-طحالب-عوالق حيوانية		+++	+++	++
النباتات العليا	متحللة، متأكسدة جزئياً، صياغتها معدلة من قِبل العضويات	0	+	++
	فاسدة قليلاً أو وسطياً	0	+	+++
				دلتا، هوامش قارية

الشكل ٤-٢٤: التجمعات الطبيعية الرئيسية من المادة العضوية في الرواسب المائية خلال التاريخ الجيولوجي. الصخور الرسوبية للكمبري حتى السيلوري تحتوي بشكل رئيس بقايا بكتيريا، طحالب، وعوالق حيوانية. تحتوي الصخور الرسوبية العائدة للديفوني حتى الجوراسي بقايا طحالب، عوالق حيوانية وبكتيريا، بالإضافة إلى قليل من المادة القارية العليا، خصوصاً في البيئات قرب الشاطئية. تحتوي الصخور الرسوبية للكريتاسي وحتى الحديث عادةً نسبة أقل من العوالق والبكتيريا ونسبة أعلى من بقايا النباتات العليا.

لقد فُيِّرَ محتوى الهيدروجين المتغير في الكيروجين في الشيل (الغضار الصفحي) مع توزع إقليمي واسع على أنه متعلق بتأثيرات أرضية (نباتات) متفاوتة، ويمكن أن يُعرف أيضاً بمساهمات من النباتات البرية إلى البيئة البحرية عن طريق تغير في مجال $\delta^{13}C$ نحو معدلات ($^{13}C/^{12}C$) أخف وزناً للكربون العضوي في الرواسب البحرية.

إنّ الكربون العضوي البحري عموماً أثقل نظائرياً من الكربون العضوي الأرضي المعاصر. نسبة هذا الاختلاف متغيرة. (وسطياً، الكربون العضوي البحري أثقل بحوالي ٥ بالألف). تم إعطاء مثالين في الجدولين (٤-٧) و(٤-٨) للبحر الأسود وبحر قزوين على التوالي. تعتبر العوالق النباتية و/أو البكتيريا المنتج الرئيس للمادة العضوية.

الجدول ٤-٧: تركيب الكتلة الحيوية والإنتاجية لأنماط مختلفة من المتعضيات في البحر الأسود.

المتعضيات	الإنتاجية بالعام % طن ^{١٠}	الكتلة الحيوية طن ^{١٠}
العوالق	13.22	2.745
العوالق النباتية (بدون بكتيريا)	13.0	2.700
العوالق الحيوانية	0.22	45
القاعيات	0.38	80
النباتات الجهرية	0.19	40
القاعيات الحيوانية	0.19	40
البكتيريا في الماء	57.60	12.000-
البكتيريا في الرواسب	28.80	6.000-
الأسماك	-	0.17
المجموع	100	<23.000

الجدول ٤-٨: تركيب الكتلة الحيوية والإنتاجية السنوية في بحر قزوين.

الكتلة الحيوية الوزن الجاف (١٠٠٠ طن)	الإنتاجية السنوية الوزن الجاف (١٠٠٠ طن)	مجموعة المتعضيات
650	200.000	العوالق النباتية
320	80.000	البكتيريا
500	15.000	العوالق الحيوانية
4.500	18.000	القاعيات الحيوانية
375	375	القاعيات النباتية
1.800	900	الأسماك

تتكون العوالق النباتية في البحر الأسود أساساً من المشطورات، (*Dinoflagellates*) و(*Coccolithophorids*). التوزيع النسبي لهذه الكائنات يتغير موسمياً وإقليمياً. أنتج في مناطق المياه الضحلة في البحر الأسود (أقل من ١٠٠ متر) كميات كبيرة من المواد العضوية. أنتجت كميات كبيرة من المادة العضوية من قِبل القاعيات النباتية. تشكل، في المنطقة الشمالية الغربية، حتى ٩% من كامل الكتلة الحيوية من نوع واحد من الطحالب (*phyllopora nervosa*). يمكن القول، أخيراً، أنه تمت مقارنة السطح لكمية واسعة من معلومات غير مكتشفة متعلقة بتركيب الكتلة الحيوية وكيف أنها مرتبطة برواسب من سحنات مختلفة.

الخلاصة والاستنتاج:

- يعتمد نمط المادة العضوية المتوضعة والمندمجة في الرواسب وبشكل كبير على التجمعات الطبيعية من المجموعات المختلفة من المتعضيات في أقاليم سحنية مختلفة. تستحق مثل هذه التجمعات الطبيعية التي تحدث على الهوامش القارية والأحواض المعزولة (البحار الهامشية)، بالنسبة للأهمية البترولية، الاهتمام الأكبر.
- تتكون كل المتعضيات بشكل أساسي من نفس المكونات الكيميائية: لبيدات، بروتينات، كربوهيدرات وليغنين في النباتات العليا. يُعدّ اللبيد المكون الأكثر أهمية، بالنظر إلى تشكّل البترول. تشمل اللبيدات المواد الدهنية، الشمع وأشباه اللبيدات، مثل الأصبغة المنحلة بالزيت، التربينويدات، الستيروئيدات والعديد من الدهون المعقدة.
- تتكون وحدة البناء الأساسية للعديد من هذه المكونات اللبيدية وأشباه اللبيدات من: وحدة الإيزوبرين (٥ ذرات كربون)، من أربع ذرات كربون متتالية، وجذر متيل متفرع جانبياً. يوجد

فرق جوهري بين التركيب الكيميائي لعوالق الطحالب البحرية والنباتات الأرضية العليا. تتكوّن المادّة العضوية للعوالق البحريّة بشكلٍ أساسيٍّ من البروتينات (حتى ٥٠% وأكثر)، كميّة متغيّرة من اللبيدات (٥ حتى ٢٥%)، وعموماً ليس أكثر من ٤٠% من الكربوهيدرات. تتكوّن النباتات العليا بصورة إجماليّة من السيللوز (٣٠ إلى ٥٠%) والليغنين (١٥ إلى ٢٥%).

- يقوم كلّ من السيللوز والليغنين بشكلٍ أساسيٍّ بوظائف الدعم، وهي غير مفيدة في عضويات العوالق المائية. الليغنين هو المساهم الرئيس الأولي للبنى العطريّة في المادّة العضوية في الرواسب الحديثة. تملك المادّة العضوية المستمدّة من الأرض مع محتوى عالي من الليغنين والكربوهيدرات على معدّل H/C حوالي ١,٠ إلى ١,٥ وهو غالباً من طبيعة عطريّة. تُشتقّ المادّة العضوية بصورة رئيسية من عوالق بحريّة محلّيّة يصل معدّل H/C فيها حوالي ١,٧ إلى ١,٩ وأكثر من طبيعة أليفانتية أو حلقيّة.