دورة الكاربون وعلاقتها بميكروبات التربة

يوجد الكاربون في الغلاف الجوي على شكل CO2، كما يوجد في المركبات التي تكون أجسام الأحياء البرية و البحرية و هياكلها، وفي التربة ضمن المادة العضوية و الدبال ، و في ا لغلاف المائي على شكل CO_3, HCO_3 ذائبة في الماء ، كما يوجد أيضاً في الغلاف الصخري والوقود الإحفوري (الفحم الحجري و النفط و الغاز الطبيعي).

تبدأ دورة الكاربون في الطبيعة بعملية التمثيل الضوئي فهي التي تحرك الكاربون في الطبيعة لو توقفت لتوقف وجود هذا العنصر في الأشكال الأخرى الحاملة له.وفي هذه العملية يأخذ النبات (المنتجات) غاز ثان اوكسيد الكاربون من الجو والضوء من أشعه الشمس والماء والتربة ليصنع منها الكربوهيدارات(المواد العضوية) في مجموعة من المعادلات نجملها في المعادلة التالية:

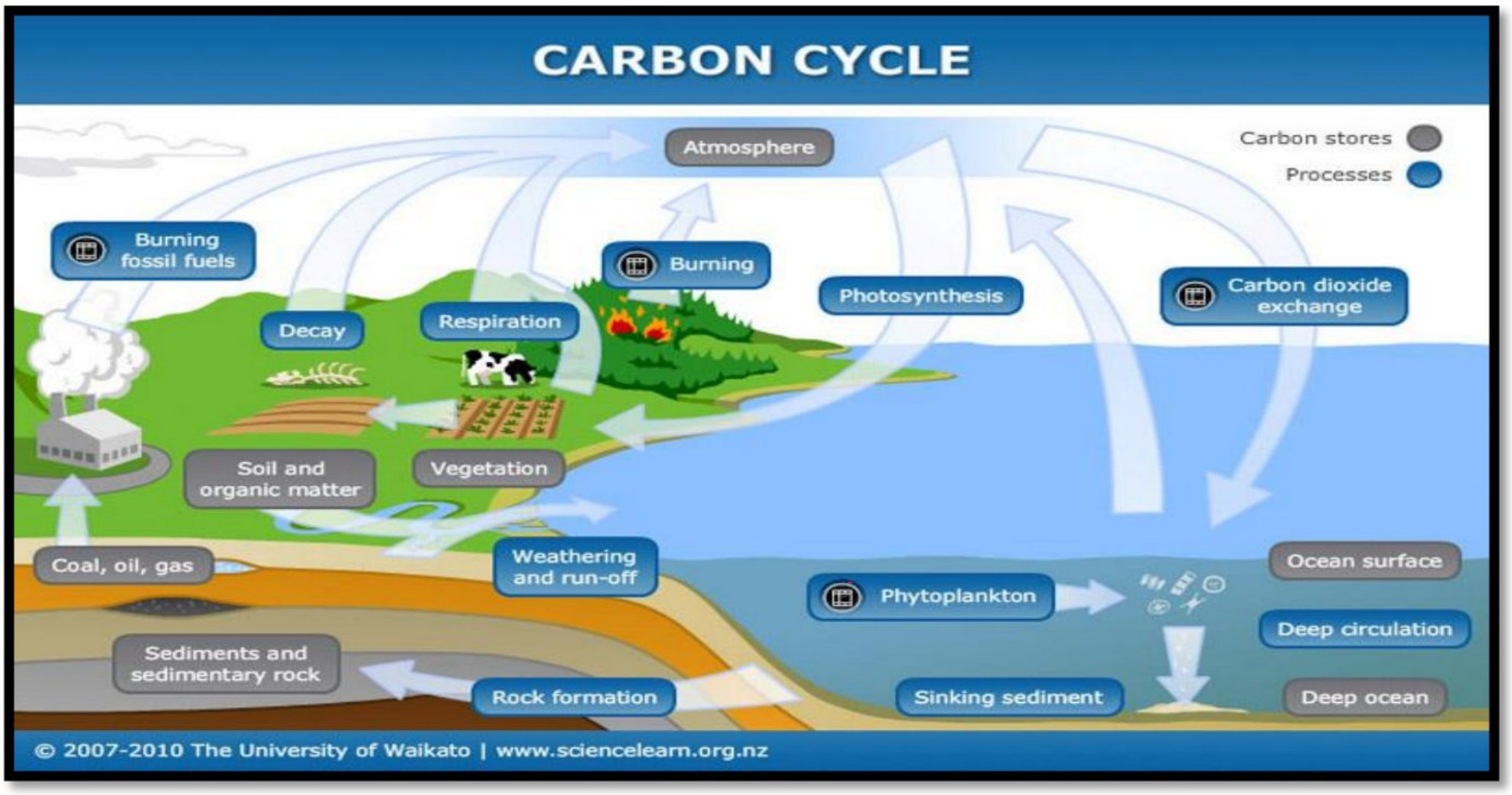
$$6CO2 + 6H_2O ___ C_6H_{12}O_6 + 6O_2$$

وفي هذه العميلة يستهلك النبات ثاني أوكسيد الكاربون الجوى ويطلق الأوكسجين .لوحظ كيف تقوم النباتات وما في حكمها من الكائنات القادرة على التمثيل الضوئي بتخليص الجو ومياه البحار وكميات من ثاني اوكسيد الكاربون المتزايد في الطبيعة من جراء حرق الوقود الاحفورى.

و في النبات أيضا تتم عملية التنفس ينتج عن ذلك غاز CO2 الذي يعود إلى الغلاف الجوي ، و من ثم يستخدم في عملية البناء الضوئي بحيث تكتمل الدورة برجوعه إلى النبات . (من الملاحظ أن دورة الكاربون مرتبطة إلى حد كبير بما يحدث لغاز (CO2 غالبا ما تتبع دورة الكاربون مسارات أكثر تعقيداً؛ فبعد تحول الكاربون الذي يكتسبه النبات إلى مواد عضوية ، تتغذى الحيوانات (المستهلكات) عليها ، فإنه تتم عملية هضم المواد العضوية و امتصاصها و تمثيلها لتساهم في بناء الأنسجة الحيوانية.

و بناء عليه فإن ذرات الكاربون الموجودة في النبات تصبح جزءاً من تركيب خلايا جسم الحيوان الذي تغذى عليها . و يمكن للكربون أن يرجع إلى الجو عن طريق عملية التنفس و ينتج من ذلك ثاني اوكسيد الكاربون . و الكاربون المتبقي في خلايا و أنسجة الكائنات الحية المستهلكة تفقد جزءا منه عن طريق إفرازاتها و فضلاتها ، و بعد موتها فإن الكاربون يؤول إلى المادة العضوية التي يمكن أن يعود منها إلى الجو بفعل عمليات التحلل الهوائية بوساطة الكائنات الحية الدقيقة (المحللات).

هناك جزء من الكاربون العضوي لا يمر بدورات من هذا النوع و بهذه السرعة ، إذ أنه يمكن أن يتتبع مسارا أطول ؛ ففي الحيوانات البحرية يدخل الكاربون في تركيب الأجزاء الصلبة منها كأصداف الرخويات و ذلك على شكل كربونات الكالسيوم . و بعد مرور فترات زمنية طويلة يثبت الكاربون في الصخور الجيرية من الترسبات البحرية لهذه الأصداف . كما يذوب قسم كبير من CO2 في مياه البحار و المحيطات و البحيرات الأمر الذي يمكن أن يؤدي إلى ترسيب الصخور الجيرية أي تثبيت الكاربون . وهذه الصخور تتعرض إلى عمليات التجوية الكيميائية مما يؤدي إلى عودة قسم من الكاربون المثبت إلى الغلاف الجوي على شكل CO2. كما يمكن للكاربون أن يصبح محتجزاً في المركبات العضوية في الوقود الأحفوري عندما تحفظ المركبات العضوية من عمليات التحلل الهوائية . و عند احتراق هذا الوقود فإن الكاربون يرجع ثانية إلى الغلاف الجوي على شكل غاز ثاني اوكسيد الكاربون ليعاد تدويره من جديد



تقوم الأحياء المجهرية بهدم الدبال وحلّه، ويتم هذا التحلل بصورة بطيئة محررة منه المغذيات النباتية بعد موت هذه الأحياء.ان احياء التربة المجهرية التي تقوم بدور مهم في دورة الكاربون هي البكتريا والفطريات.

دورة الكربون في المياه لا تختلف كثيرا عن دورته في اليابسه بل هناك ترابط بين الدورتين فالكاربون في المياه مصادره عديده فهو يأتي من ثاني اوكسيد الكربون للجو المحيط في المياه ومن البايوكربونات المتأتية مع المطر او من الصخور والتربة وكربون المواد العضوية النباتية والحيوانية والميكروبية.
تساهم جميع الأحياء المائية في دورة الكربون الطحالب والنباتات وبكتريا البناء الضوئي حيث تحول ثاني اوكسيد الكربون الى مادة عضوية مع المادة العضوية ذات الاصل الحيواني والفضلات العضوية المرمية في المياه جميعها تتعرض للتحلل الميكروبي واعادتها الى ثاني اوكسيد الكربون من جديد.
لكن تبقى هناك بعض الفروقات بين الدورتين فمثلا في المياه إنتاج الكربون العضوي يكون اساسا بفعل الطحالب وتحطيم المادة العضوية بفعل البكتريا الحقيقية. بينما على اليابسه تكون النباتات الراقية هي الأساس في انتاج الكربون العضوي وتحطيمه يكون بفعل الفطريات والبكتريا الخيطية ويكون دور الحيوانات الدنيا ذات دور اكبر من دورها في المياه.
كذلك تتاثر دورة الكربون في المياه بتوفر الاوكسجين في المياه حيث تحدث اكسدة كامله بتوفره اما في حالة عدم توفره تتكون مواد بينية غير تامة الأكسدة، هذه المواد البينبة تبقى هكذا الى ان يتوفر الاوكسجين فتتأكسد. اما اذا بقت فترة طويلة جدا ولم يتوفر الاوكسجين تترسب لتكون ترسبات جيولوجية والتي تؤدي الى تكون النفط والغازات الطبيعية.

تحلل المادة العضوية :

تتعدد مصادر المادة العضوية التي تتعرض للتحلل الميكروبي في التربة ، وتعتبر الأنسجة النباتية والمخلفات النباتية المصدر الرئيسي لتلك المواد العضوية بما تشتمله من أوراق وأغصان وجذور ،

ومن المصادر الأخرى للمادة العضوية في التربة مخلفات الحيوانات والأحياء الدقيقة وبقايا أجسامها المتحللة بعد موتها إضافة إلى المواد العضوية الصناعية التي تضاف إلى التربة كالأسمدة الصناعية العضوية والمنتجات العضوية الأخرى

عادة تنخفض نسبة المواد الذائبة في الماء والبروتينات والمعادن في حين تزداد نسبة السليلوز والهيموسليلوز واللكنين كلما تقدم عمر النبات . إن تحليل المادة العضوية من قبل الاحياء الدقيقة يهدف الى هدفين الاول الحصول على الطاقة اللازمة للنمو والثاني الحصول على الكاربون اللازم لتكوين مادة الخلية الجديدة .

معظم خلايا الأحياء المجهرية تحتوي على نسبة تتراوح بين 40-50% كاربون من الوزن الجاف للخلايا وهي تحصل عليه من المادة العضوية التي تقوم هي بتحليلها ، يطلق على تحويل الكاربون في المادة العضوية إلى كربون البروتوبلازم بعملية الاندماج **Assimilation .**

تختلف أحياء التربة المجهرية في كفاءتها في عملية تمثيل الكاربون العضوي حيث تعتبر الفطريات أكثر كفاءة من غيرها ولهذا فإن كمية CO_2 التي تطلقها الفطريات من وحدة الكاربون المحول تحت الظروف الهوائية تقل عن مثيلاتها الناتجة عن فعل المجموعات الأخرى من الكائنات المجهرية.

ويقصد **بكفاءة الكائن المجهري** قدرته على تحويل الكاربون في المادة العضوية إلى كاربون خلوي ، وكلما زادت كفاءة الكائن المجهري في التمثيل قلت كمية كل من المخلفات العضوية الناتجة وCO_2 المتحرر ، وبصورة عامة الفطريات والأكتينوماسيتات تكون أكثر كفاءة من تمثيل الكاربون من البكتريا الهوائية ، أما البكتريا اللاهوائية فأن كفاءتها تكون أقل من كفاءة البكتريا الهوائية وتنتج الكثير من المخلفات الكاربونية العضوية ولا تتحرر كميات كبيرة من الطاقة من المادة العضوية الأصلية بفعل هذه الميكروبات اللاهوائية ، المركبات الغير تامة الأكسدة التي تفرزها هذه الميكروبات يمكن لميكروبات أخرى أن تستخدمها عند توفر الظروف الهوائية مرة أخرى ، عندما تقوم الفطريات بتحليل المواد العضوية فأن 30-40% من كاربون المادة العضوية يتم تمثيله وإستخدامه في تكوين الميسليوم الجديد. أما في الكثير من أنواع البكتريا الهوائية الأقل كفاءة فأنها تمثل 5-10% من كربون المادة العضوية بينما لا تستطيع البكتريا اللاهوائية سوى الإستفادة من 2-5% من كربون المادة العضوية.

في نفس الوقت الذي يتم فيه تمثيل الكاربون فأن هناك أيضاً تمثيل لكميات من النيتروجين والفوسفور والبوتاسيوم والكبريت وغيرها ، ولما كان تمثيل هذه العناصر المعدنية من قبل الأحياء المجهرية يتحدد فقط بالكميات اللازمة لتخليق الخلية فأن معدل تمثيلها يتناسب طردياً مع كمية الكتلة الحية المتكونة من الأحياء المجهرية وهو بالتالي مرتبط بكمية الكاربون الممثلة ، وكمثال على ذلك فأنه لو أفترض إن تركيب الخلية للكائن المجهري هي في المتوسط 50% كربون و5% نيتروجين وبالإضافة للعناصر الأخرى فان كمية النيتروجين الممثلة سوف تكافيء 1/10 من كمية الكاربون المستخدمة في تكوين خلية جديدة للكائن المجهري ، من المتوقع انه عندما توجد العناصر الغذائية المعدنية الميسرة بكمية قليلة في التربة فأن الكائن المجهري يجب أن يكون ذو كفاءة عالية في تمثيل المواد الغذائية حتى يمكنه التنافس عليها وبصورة عامة خصوصاً إذا كانت من الأنواع البطيئة النمو ، أما الأنواع سريعة النمو فأن نقص كفاءة التمثيل لا يعتبر سبب يحد من قدرتها على التنافس.

يمكن الإستدلال عن مستوى النشاط الميكروبي بعدة طرق منها :

1. قياس CO_2 المنطلق أو O_2 المستهلك.
2. تقدير النقص في كمية المادة العضوية بالطرق الفيزيائية أو الكيميائية.

3. تتبع إختفاء مادة معينة مثل السليلوز أو اللكنين أو الهيميسليلوز خلال مراحل تحلل المادة العضوية في التربة.

العوامل المؤثرة في تحلل المادة العضوية داخل التربة

توجد عدة عوامل تؤثر على معدنة المواد العضوية في التربة، فسرعة أكسدة المادة العضوية تعتمد على تركيبها الكيميائي كما ويتحكم في سرعة تحللها عمر النبات ومحتواه من اللكنين وكذلك على الظروف الكيميائية والفيزيائية في الوسط البيئي ، وأهم هذه العوامل:-

1. درجة الحرارة Temperature.
2. معدل الإمداد بالأوكسجين O_2 supply.
3. الرطوبة Humidity.
4. pH التربة.
5. نسبة C:N (C:N ratio) في المادة العضوية.

1. درجة الحرارة Temperature

تعتبر درجة الحرارة من أهم العوامل البيئية المحدودة بسرعة التحلل وتمثيل المواد العضوية ، فالتغير بدرجة الحرارة سوف يعمل على تغيير مقابل في الأحياء المجهرية النشطة في عمليات التحليل ، وفي نفس الوقت يكون له تأثير مباشر على كل كائن حي مجهري داخل مجموعة الأحياء المجهرية في التربة ، ففي درجة الحرارة المنخفضة تسير عمليات تحلل المادة العضوية بمعدلات بطيئة بالمقارنة مع درجات الحرارة المعتدلة فبالرغم من أن المادة العضوية يحدث لها تحلل في درجات الحرارة المنخفضة عند 5°م أو أقل ولكن تزداد سرعة التحلل للمواد العضوية زيادة طردية كلما إتجهت الحرارة ناحية الدفء ويصاحب ذلك سرعة إختفاء المكون للمادة العضوية، لكل نوع من الأحياء المجهرية تبعاً للنشاط الكيميائي الذي تقوم به درجات الحرارة المثلى ، ونظراً لإختلاف الأحياء المجهرية نوعياً وعددياً من مكان لآخر وكذلك بإختلاف المواد العضوية المضافة لذلك لا يمكن أن تكون هناك درجة حرارة واحدة تعتبر هي المثلى بصفة عامة بكل الأحوال ، لقد كان تباين نتائج الدراسات فيما يتعلق بدرجة الحرارة المثلى لتحلل المواد العضوية فقد يكون أقصى نشاط عند 30°م ، 35°م ، 37°م ، 40°م ، لذلك يمكن إعتبار النطاق الحراري الأمثل لعمليات التحلل بين 30-40°م والتغير في درجات الحرارة في حدود النطاق الحراري الأمثل لا يؤدي إلى تغير كبير جداً في معدل تحلل المادة العضوية بالرغم من كوهن يمثل أعلى معدلات التحلل ، ولكن المدى الحراري الأقل من هذا النطاق الأمثل أي في درجة حرارة واطئة 5-30°م فأن الإرتفاع في درجة الحرارة يصاحبه زيادة في تحلل المادة العضوية ، كما أن الزيادة في درجات الحرارة عن 40°م يقلل من سرعة التحلل إلا في حالات خاصة عندما تقتصر العملية على أنواع مُحبة للحرارة العالية.

2. الإمداد بالأوكسجين O_2 Supply

إمداد التربة بالهواء يعتبر عاملاً محدداً لتحلل المادة العضوية حيوياً والسبب في ذلك يعود إلى دور الأوكسجين في عمليات التحول الغذائي للأحياء المجهرية ، فعند الظروف اللاهوائية يقتصر إنطلاق CO2 الناشئ من تحلل المادة العضوية على الأحياء المجهرية اللاهوائية بينما

تعمل زيادة التهوية على تنشيط عملية معدنة الكاربون لذلك فأن معدل التحلل المادة العضوية يقل كلما قل معدل الإمداد بلأوكسجين.

3. الرطوبة Humidity

يعتبر توفر قدر كافٍ من الرطوبة مهماً لإستمرار عمليات التحلل فالكائنات الدقيقة تنمو بسرعة في المزارع السائلة بشرط إمدادها بالأوكسجين ، أما في التربة فأن مستويات الرطوبة العالية تعمل على خفض النشاط الحيوي للأحياء المجهرية حيث إنها تؤدي إلى إعاقة حركة الهواء في التربة فيقل إمداد الأوكسجين ، لذلك فإذا ما لوحظ تأثير مُنشط في إنتاج CO_2 نتيجة إضافة الماء فأن نقص الرطوبة في التربة يكون في هذه الحالة هو العامل المحدد للنشاط ، أما إذا أدت إضافة الماء إلى حدوث تأثير مثبط فيكون عادةً بسبب نقص في كمية الأوكسجين بالنسبة للأحياء المجهرية. عند مستوى الرطوبة المنخفض يكون لإضافة الماء تأثير كبير على تحلل المادة العضوية بينما يكون تأثير هذه الإضافة قليل إذا كانت رطوبة التربة بالقرب من المستوى الأمثل لها والزيادة عن الحد الأمثل تؤدي إلى إنخفاض عمليات التحلل ، عندما تتراوح نسبة الرطوبة بين 60-80% من السعة المائية القصوى في التربة فأن عمليات التحلل تكون في أقصى درجاتها عندما تكون الظروف البيئية لأخرى ملائمة.

4. pH التربة

يعتبر pH محلول التربة من العوامل المحددة لتحلل المادة العضوية فلكل نوع من البكتريا والفطريات والأكتينوماسيتات درجة مثلى لنموها ، كما أن لها نطاق معين من تركيز أيون الهيدروجين لا تنمو خارجه بالإضافة إلى ذلك فأن الأنزيمات التي تنتجها النوع الواحد من الأحياء المجهرية ، تتأثر هي الأخرى بـ pH الوسط ، لذلك فإن قيمة pH التربة يعتبر عاملاً محدداً لأنواع الكائنات الحية المجهرية التي تشترك في إتمام دورة الكاربون وعلى العموم تتحلل المواد العضوية في التربة ويكون بمعدلات أسرع في الوسط المتعادل أو القريب من التعادل ولذلك أن هذا المستوى من تركيز أيون الهيدروجين يتيح المجال لإشتراك أنواع عديدة من محللات المواد العضوية ويكون للفطريات دور بارز في عمليات التحلل التي تتم في التربة.

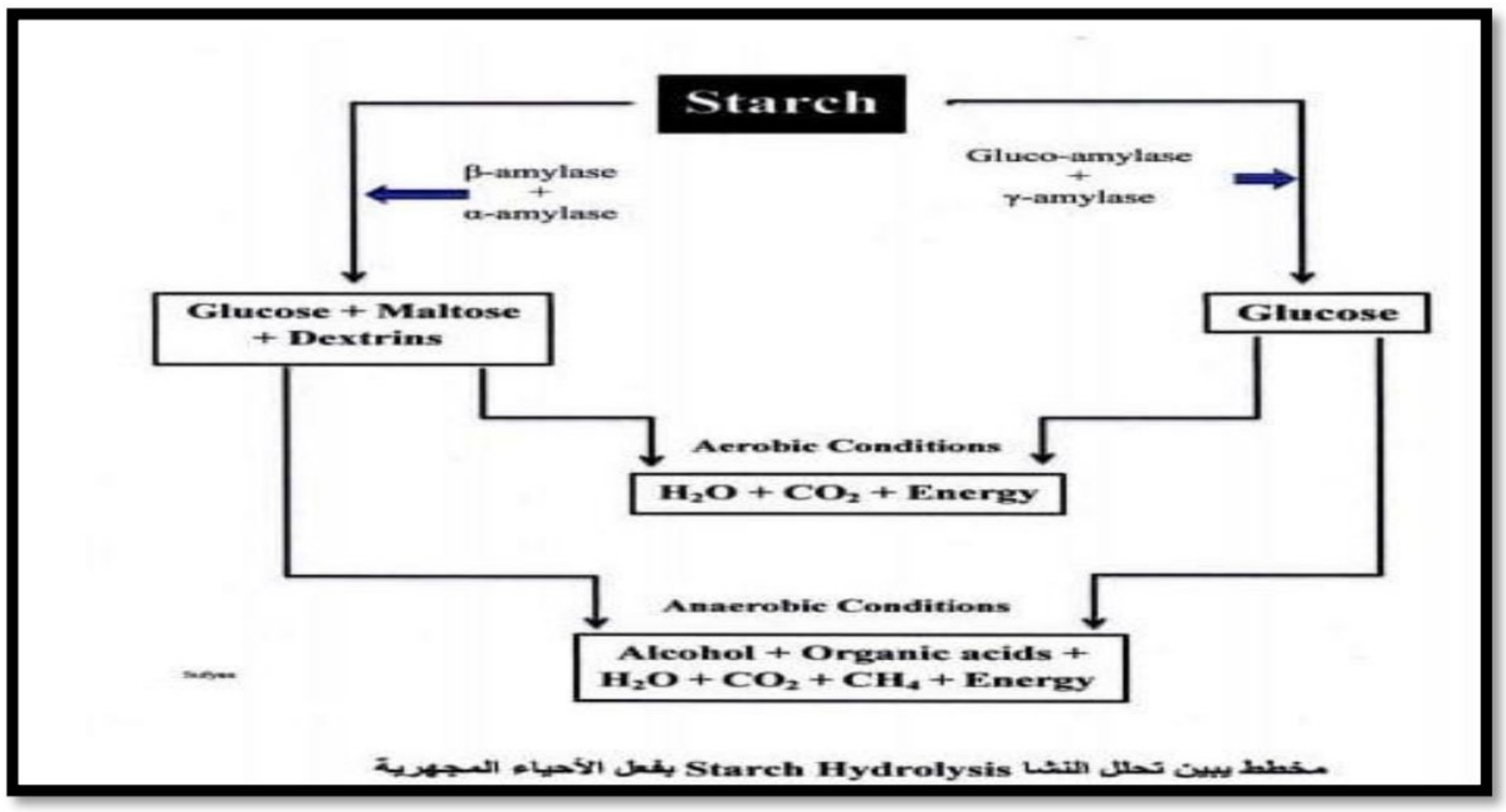
5. نسبة الكاربون الى النيتروجين (C:N) :

يعتبر النيتروجين من العناصر الغذائية الأساسية لنمو الأحياء المجهرية وبالتالي لعمليات تحلل المادة العضوية إن الأنسجة النباتية تختلف في نسبة C:N وتتراوح هذه النسبة بين 20:1 إلى 30:1 في المحاصيل البقولية والسماد الحيواني وتصل إلى 100:1 في بعض البقايا النباتية عندما يتوفر النيتروجين في المادة العضوية بكميات كبيرة وبصورة مُيسّرة (جاهزة) فأن الأحياء المجهرية تستوفي حاجتها من هذا العنصر من المادة العضوية ، ولا يكون هناك إحتياج كميات إضافية للنيتروجين ، أما إذا كانت المادة العضوية فقيرة في محتواها لهذا العنصر فأن التحلل يحدث ببطء ، وعند إضافة مركبات تحتوي عنصر النيتروجين (أسمدة كيميائية) أو فأنها تسرع من عملية التحلل أما في حالة المادة العضوية الحاوية على مستويات من النيتروجين كافية كأنسجة النباتات البقولية فأنها تتحلل بمعدل سريع وتنعدم إستجابة الأحياء المجهرية أو تظهر إستجابة بسيطة جداً عند إضافة أسمدة كيميائية نيتروجينية ، والجدول التالي يوضح محتوى الأنسجة النباتية

من النيتروجين لبعض أنواع النباتات ويمكن في ضوء هذه النسب إحتساب نسبة C:N على إعتبار أن نسبة الكاربون في المادة العضوية يتراوح بين 45-50% على أساس الوزن الجاف.

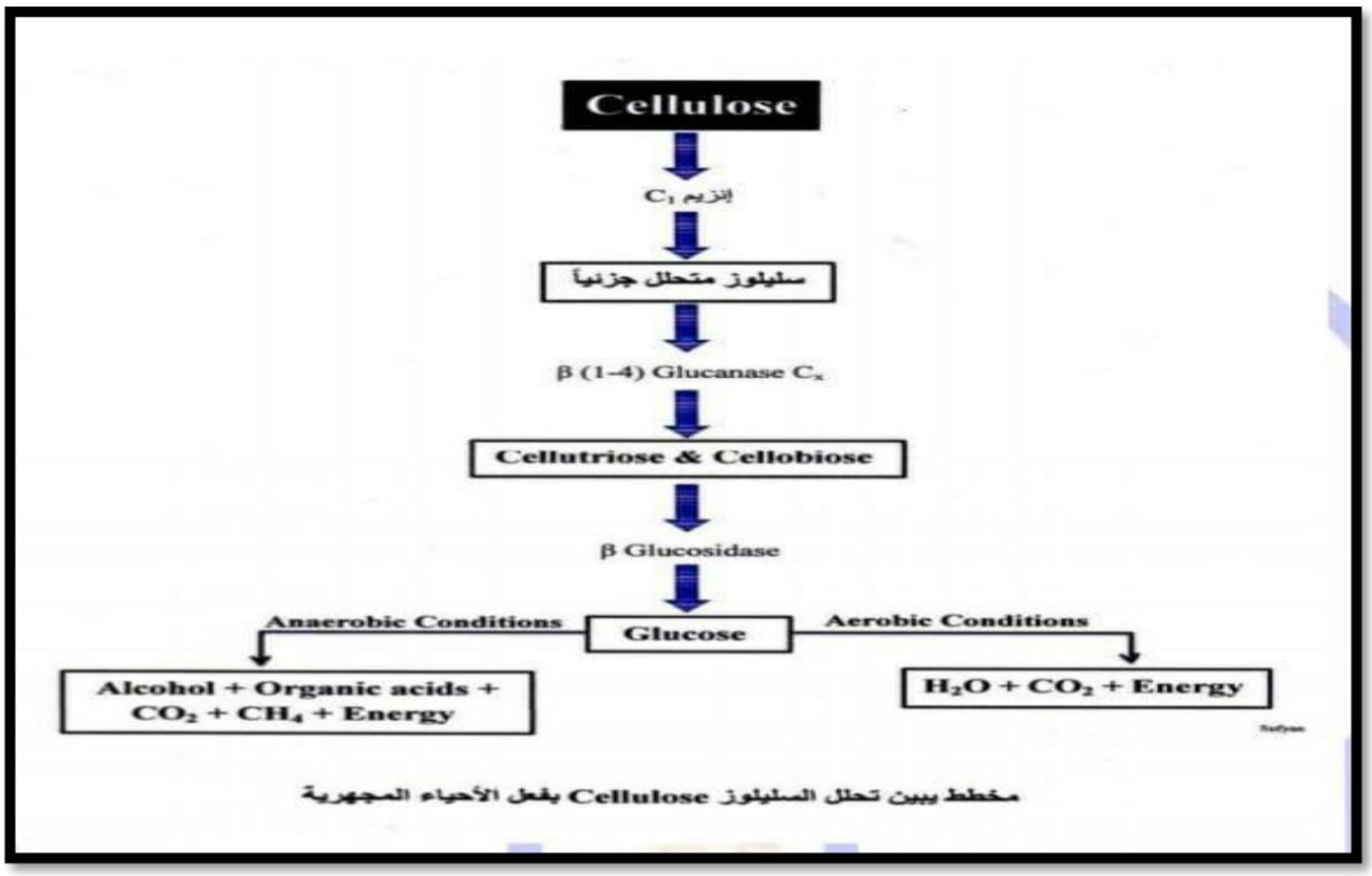
يوجد العديد من الأحياء المجهرية الدقيقة التي لها القدرة على هضم وتحليل الكثير من المواد العضوية كالهايدروكاربونات والسليلوز والهيميسليلوز والسكريات المتعددة مثل النشا Starch بفعل إنزيماتها التي تكسر الأواصر الرابطة لهذه المركبات، حيث تحول هذه الأحياء تلك المركبات إلى مواد أبسط يسهل إمتصاصها وتحرير الطاقة منها. وتبين المخططات التالية مسارات التفاعل والتحليل لبعض المواد العضوية.

تحلل النشاء Starch hydrolysis



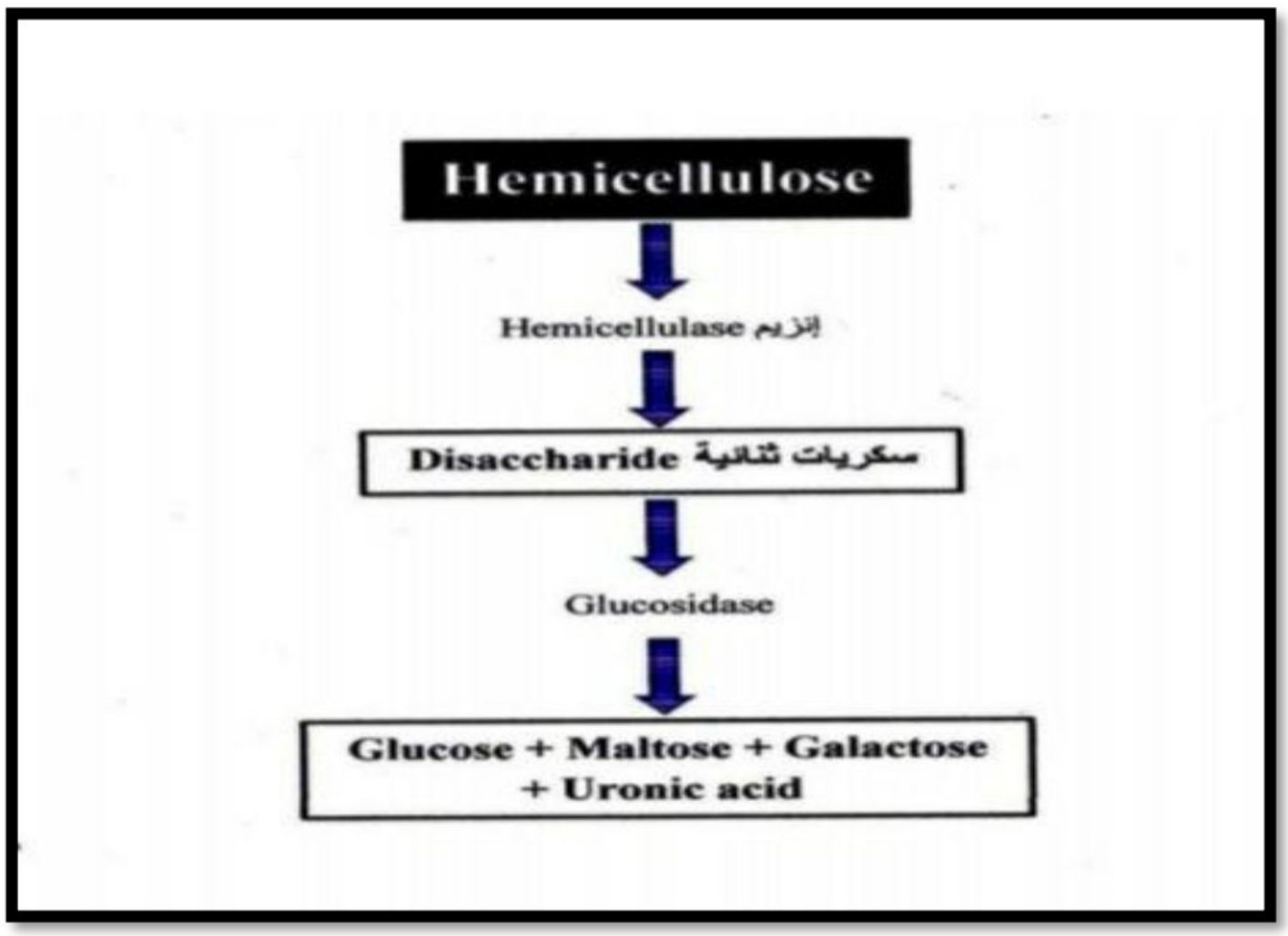
مخطط يبين تحلل النشا Starch Hydrolysis بفعل الأحياء المجهرية

تحلل السليلوزCellulose:



مخطط يبين تحلل السليلوز Cellulose بفعل الأحياء المجهرية

تحلل الهيميسليلوز Hemicellulose :



يوجد العديد من الأحياء الدقيقة التي لها القدرة على الإشتراك في تحليل الهيموسليلوز وهو أكثر من الأحياء الدقيقة التي لها القدرة على تحلل السليلوز ، ومن أنشط الأجناس البكتيرية في تحليل الهيموسليلوز:

Bacillus , Psedomonas , Achromobacter , Vibrio , Cytophaga

كما أن الكثير من أجناس الـ Actinomycetes لها القدرة على ذلك.

أما أشهر أجناس الفطريات:

Alternaria , Fusarium , Aspergillus , Penicillium , Rhizopus