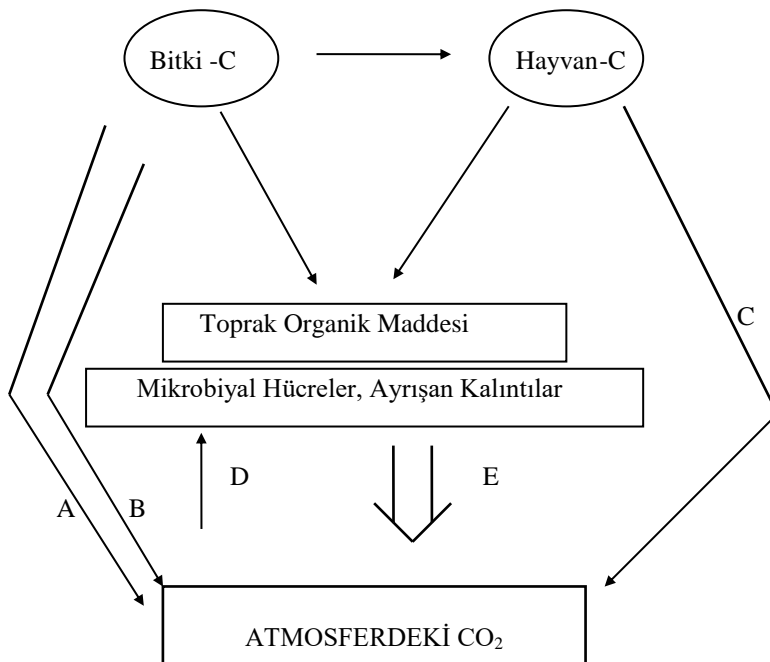


Karbon Döngüsü

Karbon, canlı hücrenin en önemli yapı taşlarından birisi ve biyolojik sistemin en önemli elementidir. Bitki ve mikroorganizma hücreleri büyük düzeyde karbon içerirler. Bu içerik kuru ağırlık esas alındığında % 40-50 düzeyindedir. Karbonun oksidasyonu (organik maddedeki karbonun mineralizasyonu veya solunumu) ile oluşan CO₂ ise atmosferin ancak % 0.03' ünü oluşturur. Karbondioksit, yeryüzündeki karasal ekosistemde fotoototroflar tarafından (Hata! Yer işareti tanımlanmamış. yüksek bitkiler ve su sisteminde de algler tarafından organik karbona dönüştürülür (immobilizasyon Hata! Yer işareti tanımlanmamış.)). Böylece bu ilkel veya yüksek fotoototrofik canlılar güneş enerjisi+karbon+diğer besin elementleri varlığında ve klorofilin katalizörlüğünde heterotrofik canlılar için gerekli olan organik substratları sağlarlar. Atmosfer karbonunun sürekli olarak fotosentetik organizmalar tarafından organik karbon şekline dönüştürülmesi, ekosistem Hata! Yer işareti tanımlanmamış. bileşenlerinin dengesini bozduğundan, dengenin oluşabilmesi için bu karbonlu bileşiklerin parçalanmaları ve CO₂'in tekrar atmosfere dönmesi gerekmektedir. Yeryüzü bitki örtüsünün bir yıl içinde 1.3x 10¹⁴kg düzeyinde karbondioksit kullandığı hesaplanmıştır (atmosfer toplamının 1/20'si). Bitkiye yarayışlı karbonun (CO₂) her yıl bu kadar büyük miktarının organik dokuya çevrilmesi, mikrobiyal dönüşüm olmadığı koşulda ana bitki besin elementinin sınırlı olduğunu göstermektedir. Gerçekten de mikroorganizmaların organik karbonu mineralizasyon Hata! Yer işareti tanımlanmamış. yolu ile karbondioksite çevrimi olmadığı varsayıldığında atmosfer rezervinin 35 yıl içinde tükeneceği tahmin edilmektedir.

Genel anlamı ile toprak ekosisteminde karbon döngüsü, CO₂' in bitkiler tarafından fiksasyonu ve organik bileşiklerin sentezi için özümlemesini, bitkisel organik kalıntılar ile primer (herbivor) ve daha üst düzey tüketicilere (carnivor) aktarılan kısmından dışkı ve kadavralara aktarılan kısmının mikroorganizmalarca ayrıştırılması ve tekrar karbondioksit şeklinde atmosfere verilmesini tanımlamaktadır. Biyosferdeki karbon döngüsü daha karmaşık olup akvatik sistemde biriktirilmesi ve antropojenik Hata! Yer işareti tanımlanmamış. aktivitenin (insan faaliyetleri) döngüye olan girdileri bazı farklılıklar oluşturmaktadır. Şekil 10.2'de toprak ekosistemindeki C döngüsü, Şekil 10.3'de ise biyosferdeki C döngüsü şematize edilmiştir.



- A. Fotosentez B. Solunum, bitkiler C. Solunum, hayvanlar
D. Ototrof **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** mikroorganizmalar E. Solunum, mikroorganizmalar

Şekil 10.2. Toprak ekosisteminde C döngüsü

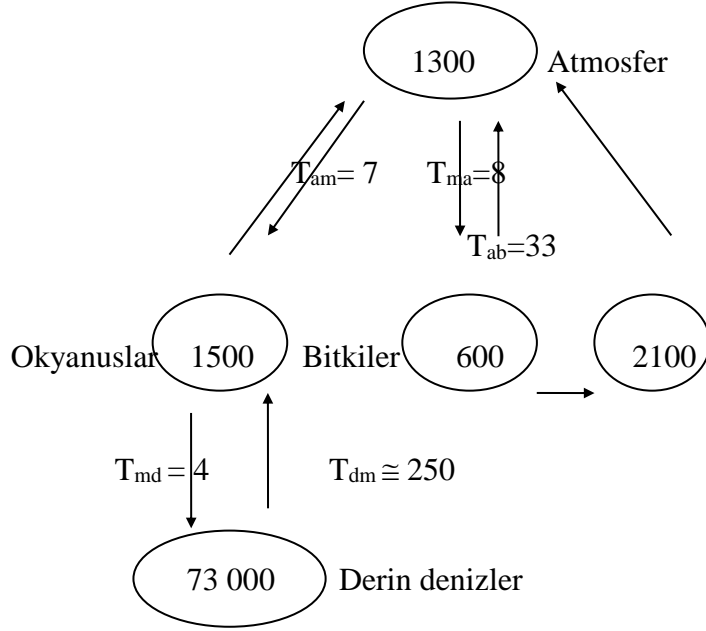
Jeokimya kavramı, yer kabuğunun kimyasal bileşimi ve elementlerin yer kabuğunun değişik kısımları ve hidrosfer, atmosfer arasındaki hareketleri ile ilgilidir. Biyosferin canlı ve cansız kısımları arasındaki madde değişimi ise **biyojeokimyasal** döngü olarak tanımlanır. Biyolojik bakımdan karbon döngüsü, yeşil bitkilerin CO₂ 'i fotosentetik olarak redükte **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** etmesi ve bunun daha sonra bitki, mikroorganizma ve daha az olmak üzere hayvan solunumu ile atmosfere geri bırakılmasıdır. Ancak bu döngü jeokimyasal bakımdan oldukça basit bir ifadedir. Karbon döngüsünün en önemli kısmı hava, deniz ve karasal biyosfer **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** arasındaki değişimlerdir (Şekil 10.4). Bu üç C rezervuarından en büyüğü okyanuslar olmakla birlikte, üniform değildir. Üst 50-100 m'ye kadar olan karışık katman deniz yaşamının çoğunu kapsar. Okyanusların bu karışık yüzeysel kısmı ile atmosfer ve karasal biyosfer **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** (yeşil bitkiler, hayvanlar toprak organizmaları) arasında döngü zamanı yıllar veya on yıllarla ölçülen "hızlı" bir C-döngüsü bulunmaktadır. Derin deniz katmanları ile olan değişim çok daha yavaş olup yüzlerce yıl olarak tanımlanmaktadır.

Şekil 10.3. Çevresel karbon döngüsü (Biyojeokimyasal döngü)

Kayaç ayrışması ve okyanuslardaki karbonatların çökmesi veya çözünmesini kapsayan çok yavaş döngü ise 100 000'lerce yıl olarak belirtilebilir.

Hızlı karbon döngüsü ilk kez Craig tarafından 1957'de ortaya konmuştur (Şekil 10.5). Hızlı döngüde karbonun çoğu derin denizlerde bulunmaktadır. Bu rezervuar bile, yavaş karbon döngüsündeki C miktarı ile kıyaslandığında, küçük kalmaktadır. Örneğin kalkerli sedimentler

28 500, killi-balçık sedimentler ise 10 600 kez olmak üzere atmosfer karbonundan daha fazla C içerirler.



Şekil 10.4. Atmosfer-Hidrosfer-Karasal Biyosfer arasındaki C akışı. Rezervuar değerleri g/m^2 olup, T yıl olarak çeşitli rezervuarlar arasındaki değişime ilişkin alıkonma zamanlarıdır.

Şekil 10.5. Antropojenik girdinin bulunduğu genel C döngüsü. Rakamlar değişik rezervuarlardaki C miktarının veya bir rezervuardan diğerine olan yıllık akışı göstermektedir (10⁹ ton)

10.3.1. Karbon özümlemesi

Organik maddenin ayrışması, mikroflora **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** için iki farklı işlev görmektedir. Bunlardan **birincisi**, mikrobiyal gelişme için enerji sağlamak; **ikincisi** ise yeni hücre maddelerinin oluşturulması için C sağlamaktır. Mikrobiyal metabolizma sonucu serbest bırakılan karbondioksit, metan **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**, organik asitler **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ve alkoller gibi ürünler yalnızca metabolik atıklar olup, mikrobiyal gelişme bakımından çok kullanılır nitelikli ürünler değildir. Bu ürünler organik maddenin ayrışması ve enerjinin yararlı konuma çevrimi sırasında son ürün olarak açığa çıkarlar. Toprakta yaşayan canlılar için en önemli işlev enerji ve karbon sağlamaktır. Çoğu mikroorganizma hücreleri, yaklaşık % 50 oranında C içerirler. Karbon elementinin kaynağı klorofilli bitkiler için CO₂ olmasına karşın, toprak mikroorganizmaları büyük ölçüde karbonlu maddeleri ana kaynak olarak kullanırlar. Bu substrat **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** karbonunun protoplazmik karbona çevrimi olayına "karbon özümlemesi" (asimilasyon **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**) adı verilmektedir. Oksijenli koşullar altında, substrat karbonunun % 20 ile 40 kadarı özümленir, geri kalan kısmı CO₂ olarak açığa çıkar veya atık ürünler olarak birikir. Şekerler gibi basit C kaynakları kullanarak asimilasyon gücü hakkında fikir edinilebilirse de, heterojen organik maddeler ve bitki kalıntıları ile karbon asimilasyonunu ölçmek kolay değildir. Çünkü substrattaki C'un ne kadarının mikrobiyal hücrede ve ne kadarının henüz ayrışmamış organik maddede bulunduğunu saptamakta zorluklar bulunmaktadır.

Mikroorganizmalar tarafından kullanılan organik substratlardaki enerjinin çok az bir kısmı anaerobik mikroflora **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** tarafından açığa çıkarılmaktadır. Anaerobik özümleme sonunda açığa çıkan ve tam olarak oksitlenmemiş maddeler, yaşam ortamına oksijen difüzyonu artışı ile mikrobiyal gelişme için kullanılırlar. Mantarlar tarafından gerçekleştirilen ayrışma sırasında, metabolize edilen karbonun ortalama % 30 ile 40'ı yeni misel **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** oluşumu için kullanılır. Daha az etkin olan aerob bakteri **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** grupları % 5-10 düzeyinde özümleme yaparken, anaerob bakteriler, kullanılan C'un ancak % 2-5'ini hücre maddesi şekline çevirebilirler.

Yeni protoplazmanın oluşması için karbon özümленirken, aynı zamanda N, P, K ve S gibi besin elementlerine de gereksinilir. Bu anorganik **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** besin iyonlarının özümlenmesi, pratik yönden büyük önem taşımaktadır. Çünkü tarla tarımı yönünden, besin elementi özümlemesi, immobilizasyonun karşıtıdır. Mikrobiyal immobilizasyon **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**, toprakta bitkilere yarayışlı besin maddelerinin azalmasına -geçici bir zaman için de olsa- neden olan bir mekanizmadır. Bu olay,

bitki besin elementlerinin hücre sentezi için kullanılması yolu ile olduğundan, immobilizasyonun düzeyi, yeni oluşturulan protoplazmanın C/NHata! Yer işareti tanımlanmamış., C/P, C/K, veya C/S oranları ile yönlendirilen bir faktör tarafından C özümlemesi ile ilgili olup, mikrobiyal hücre ve filamentlerin net miktarı ile orantılıdır.

Örnek olarak, mikrofloranın ortalama hücre bileşiminin % 50'si karbon ve % 5'i azot kabul edilirse, immobilize olan N, mikrobiyal hücre üretimine giren karbonun onda birine eşit olacaktır.

10.3.2. Toprak solunumu

Toprak mikroflorasının en önemli işlevi organik maddelerin ayrıştırılmasıdır. Organik maddenin içerdiği organik asitlerHata! Yer işareti tanımlanmamış., polisakkaritler, ligninler, aromatikHata! Yer işareti tanımlanmamış. ve alifatik hidrokarbonlar, şekerler, alkoller, amino asitler, pürinler, primidinler, proteinler, yağ ve nükleik asitler bir veya daha fazla popülasyonun etkisi ile temel bileşenlerine kadar ayrıştırılır. Bu sırada gerekli olan enerji, karbonlu maddelerin oksidasyonu ile sağlanır.

Organik madde ayrışması bütün heterotrofların bir özelliği olduğundan, mikrobiyal aktivitenin göstergesi olarak değerlendirilebilir. Bu işlev sonucu aerobik ayrışma koşullarının son ürünü olarak CO₂ çıktığından, belirli bir biyokütleHata! Yer işareti tanımlanmamış. içeren toprak kütlesinin oksijen tüketimi ve CO₂ oluşması "toprak solunumuHata! Yer işareti tanımlanmamış." olarak tanımlanır. Organik madde ayrışma oranlarını belirlemek için çeşitli teknikler geliştirilmiştir. Bunlar;

- i. CO₂ oluşumunun veya O₂ tüketiminin ölçülmesi,
- ii. Organik maddede ağırlık kaybı veya kimyasal değişimlerin saptanması,
- iii. Selüloz, ligninHata! Yer işareti tanımlanmamış., hemiselülozHata! Yer işareti tanımlanmamış. gibi özel bileşiklerin gideriminin gözlenmesidir.

Çok özet bir ifade ile toplam solunum olayı fotosentezin karşıtı olarak tanımlanabilir. Örneğin basit şekerler, oksijen tüketimi sonucunda karbondioksit ve suya dönüştürülür ve aynı zamanda enerji elde edilir. Toprakta solunum aktivitesinden kaynaklanan karbondioksitin 2/3'ü mikroorganizma aktivitesinden, 1/3'ten azı da bitki kök solunumundan kaynaklanır. Çok az bir kısmı da toprak hayvanlarının aktivitesi ile oluşur. Bundan dolayı toprak solunumuHata! Yer işareti tanımlanmamış. toprakların toplam biyolojik aktivitesini yansıtır.

10.3.3. Toprak organik maddesinin ayrışması

Humusun mineralizasyonu sırasında ilişkili olarak açığa çıkan karbondioksit oranı, toprak tipine bağlı olarak büyük ölçüde değişir. Kontrollü laboratuvar koşullarında ve mesofilikHata! Yer işareti tanımlanmamış. sınır değerlerinde (20-30 °C) CO₂ üretim oranı genellikle 5 ile 50 mg CO₂ kg toprak⁻¹ gün⁻² düzeyinde olmaktadır. Tarla koşullarında ise bu oran daha düşük olup 0.5-10g CO₂ m⁻² gün⁻¹ düzeylerinde gerçekleşmektedir. Tarla gözlemleri değerleri mikrobiyal aktivite yanında, toprak hayvanları ve kök solunumundan kaynaklanan CO₂ miktarını da yansıtmaktadır. Bu değerler toprak sıcaklığı, toprak su kapsamı, mevsim ve günlük koşullara bağlı kalmaktadır. Denemeler, humusta bulunan karbonun %2 ile 5 kadarının yıllık olarak mineralize olabildiğini göstermektedir. Bu kayıp miktarı önemli olmakla birlikte, bu açık vejetasyonHata! Yer işareti tanımlanmamış. kalıntılarının toprağa dönmesi ile dengelenmektedir. Bir kural olarak, heterotrofik aktivite ile kaybolan CO₂

miktarının toprağa giren kökler, yaprak ve diğer bitki kalıntılarında yaklaşık olarak eşit olduğu ve bazı dönemlerde kayıpların girdi miktarından fazla olduğu ve bazı yıllarda da toprağa gelen organik madde girdisinin daha fazla olabildiği belirtilmektedir.

Humus ayrışmasını yöneten temel faktörler şunlardır:

- Toprağın organik madde düzeyi
- Toprak işleme
- Sıcaklık
- Nem
- pH
- Derinlik ve havalanma

Bu tanımlanan çevresel etkiler mikrobiyal gelişme ve aktiviteyi etkilediğinden dolayı, doğal organik maddeyi veya ortama ilave edilen bileşiklerin değişimlerinin oranını etkiler.

Karbon mineralizasyonunun büyüklüğü, toprağın organik karbon kapsamı ile doğrudan ilişkilidir. Diğer bir deyimle serbest bırakılan CO₂ miktarı, organik madde düzeyi ile orantılıdır. Benzer olarak humus **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** yüzdesi ile oksijen tüketimi arasında da yüksek düzeyde ilişki bulunmaktadır.

C¹⁴ etiketleme yolu ile yapılan mineralizasyon **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** çalışmaları, toprağa glikoz **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** gibi hızlı ayrışan basit organik substratların verilmesi durumunda, diğer organik fraksiyonların ayrışmasının hızlandığını göstermektedir. Ancak bu her zaman için geçerli olmayıp bunun aksi de olabilmektedir.

Toprak işlemenin organik madde bozunmasını arttırdığı belirtilmektedir. Yirmibeş yıl ve daha fazla tarım yapılan alanlarda gözleme alınan yirmi sekiz toprakta, organik madde kapsamının yarıdan fazla azaldığı saptanmıştır. İlk bir kaç yıl içinde organik karbondaki hızlı azalmadan sonra, daha ileri düzeyde kültivasyon **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** sırasındaki azalma daha kademeli olmaktadır. Örneğin % 2.30 düzeyinde organik madde kapsayan bakir orman toprağının işlenmesi ile üç yıl içinde organik madde kapsamının % 1.59'a düştüğü belirlenmiştir.

Sıcaklık, nem ve pH da kritik çevresel değişkenlerdir. Humus ayrışması donma noktasına doğru inildikçe azalmakta, artan sıcaklık ile hızlanmaktadır. Donma olayı, mineralizasyon **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** üzerine değişik bir etki oluşturmakta ve donma fazı geçiren topraklardaki CO₂ bırakılma oranı, donma fazı ile karşılaşmamış topraklardan daha fazla olmaktadır. Bu olay büyük olasılıkla organik maddenin agregatlardaki bulunuş şekli ve donma-çözülme sonucu integrasyonun bozulması ile ilgili olabilir.

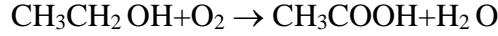
Su düzeyi de organik madde ayrışması ve toprak solunumu **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** üzerine etkiler yapmaktadır. Maksimum bir biyolojik aktivite için çevrede yeterli düzeyde nem bulunmalıdır. Toprakta oluşan CO₂ oranı, toprağın kuruma ve ıslanma süreçlerinden etkilenmektedir. Bu gibi döngüler, sürekli belirli bir nem düzeyi koruyan topraklarla kıyaslandığında mikrobiyal aktiviteyi uyarır nitelikli görünmektedir. Diğer faktörler de benzer düzeyde etkilidirler. Örneğin, karbon mineralizasyonu nötral ve hafif alkali topraklarda en hızlı olmakta, asit koşullarda yavaşlamakta ve nitelik değiştirmektedir.

Toprakların heterotrofik aktivitesi yalnızca azot, fosfor ve diğer anorganik **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** besin maddeleri yolu ile kısıtlanmayıp ilaveten kolay kullanılabilir organik besinlerin yetersiz oluşu da etki yapmaktadır. Karbondioksit çıkışının en büyük oranı, toprak profilinin yüzeye yakın kısımlarında olmaktadır. Bunun nedeni bitki dokularının en fazla bulunduğu kısım olmasıdır. Bu aktivite toprak derinliğine ve dolayısı ile organik karbon düzeyinin azalışı ile paralellik göstermektedir.

Organik topraklardaki en önemli mikrobiyolojik değişimlerden biri, biyolojik ayrışmaya bağlı olarak toprağın büzülmesi ile ortaya çıkan çökmelerdir. Bu olay hem tarımsal verimlilik kayıplarına neden olması ve hem de yol inşaatları gibi mühendislik işlemlerinde sorunlara yol açmaktadır. Bu gibi topraklarda yılda 0.2 ile 7 cm civarında çökme oluşabilir.

Burada ana etken biyolojik olmakla birlikte ayrıca rüzgar erozyonu ve fiziksel büzülme etkileri ile de ilişkilidir.

Toprağa basit substratlar ilave edildiğinde bunlar hızlı bir şekilde metabolize olurlar. Ancak her zaman maksimum oksidasyon **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** oranına ulaşmadan önce durgun bir dönem (lag **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** period) söz konusudur. Bu faz organik maddenin hızlı döngüsünü sağlayacak düzeyde yeterli aktif popülasyonun artışı için gerekli zamandır. Yalnızca etanol lag faz olmaksızın hemen okside **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** edilir ve her bir mol etanol için mol oksijen kullanılır. Bu reaksiyon sonucunda ortamda asetik **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** asit **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** birikir:



Asetat'da lag **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** faz olmaksızın oksitlenir, fakat aktivite hızlı bir şekilde azalır.

10.3.4. Toprağa katılan bitki kalıntıları ve diğer karbonlu maddelerin ayrışmaları

Toprağa katılan bitki kalıntılarının çeşitliliği nedeniyle mikroflora **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** fiziksel ve kimyasal bakımdan heterojen maddelerle temasa gelir. Bitkilerin organik bileşenleri genellikle altı geniş gruba ayrılmaktadır. Bunlar;

- Selüloz, en yaygın bitki bileşeni olup, kuru ağırlığın % 15 ile % 60'ını oluşturur.
- Hemiselülozlar, dokuların % 10 ile %30 'unu oluştururlar.
- Lignin, karmaşık yapıları ve ayrışmaya dirençli olan bitki bileşeni olup, dokuların % 5 ile % 30'unu oluşturur.
- Suda çözünebilir maddeler, basit şekerler, amino asitler ve alifatik asitler olup, doku ağırlığının % 5 ile % 30'unu oluştururlar.
- Eter ve alkol **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** çözünen bileşenler. Bunlar yağlar, mumlar, reçineler ve pigmentler olarak gruplanabilir.
- Proteinler, yapılarında bitki azot ve kükürdünün çoğunu içerirler. Genellikle kül tayini ile belirlenen mineral maddeler toplam dokunun % 1 ile % 13'ünü oluşturur. Bitki yaşı ile birlikte suda çözünen maddeler, proteinler ve mineral maddelerin miktarı azalır, selüloz **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**, hemiselüloz **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ve lignin **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**'in yüzdesi artar.

Toprağa katılan organik maddelerin mineralizasyonuna bir seri faktör etki yapar. Her hangi bir substratın okside **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** edilme hızı onun kimyasal bileşimine ve çevrenin fiziksel ve kimyasal koşullarına bağlıdır. Bu faktörler şunlardır:

- Sıcaklık,
- O₂ temini,
- Nem,
- pH,
- Anorganik besin maddeleri,
- Bitki dokularının C/N **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** oranları.

Sıcaklık, doğal maddelerin metabolizasyonunu kontrol eden çevre faktörlerinin en önemlilerinden birisidir. Sıcaklıktaki değişimler, komünitedeki her bir organizma üzerine etki yaptığı gibi, aktif floranın tür bileşimini de değiştirir.

Kabul edilebilir bir organik madde ayrışması 5⁰ C veya biraz daha düşük sıcaklıklarda olabilir de, bitki dokularının ayrışması artan sıcaklık ile hızlanır. Ancak organik madde ayrışması için tek bir optimum belirtilemez. Karbonlu besin maddelerinin ayrışma optimumu 30⁰-40⁰C'ler arasında bulunur.

Havalanma karbon mineralizasyonunu değişmez bir şekilde uyarır. Bu nedenle bitki bileşenlerinin ayrışması, oksijen kısıtlılığında baskı altına alınır. Ayrışma süreçlerinde gereken oksijenin sağlanması, toprağa ilave edilen substratların ayrışma oranını kontrol eden bir faktördür.

Mikroorganizmaların gelişmesi uygun nem koşullarına bağlı olmakla birlikte, yüksek nem düzeyleri O₂ difüzyonunu engellemesi ile mikrobiyal aktiviteyi azaltarak organik madde ayrışmasını etkiler. Mikrobiyal aktivitenin optimum nem koşulları olan tarla kapasitesinin % 60-70 'i su düzeyleri, organik madde ayrışması için de optimum değerleri verir.

C döngüsünün oranını tayin eden diğer bir önemli faktör, toprak çözeltisinin hidrojen iyonu derişimidir. Bakteri, mantar**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ve aktinomisetlerin bir pH optimumları vardır. pH herhangi bir habitattaki C döngüsü ile ilişkili mikroorganizmaların tipini tayin eder. Tipik ayrışma olayları asit topraklara göre nötral ortamlarda daha hızlı gerçekleşir. Benzer şekilde asit toprakların kireçlenmesi bitki dokularının veya doğal toprak organik maddesinin ayrışmasını hızlandırmaktadır.

Azot, mikrobiyal gelişme ve organik madde ayrışması için kontrol edici bir besin maddesidir. Bitki ve hayvan dokularının her zaman azot içermelerine karşın, onun yarayışlılığı ve miktarı çok değişiktir. Şayet substratın azot kapsamı iyi ve element hızla kullanılabiliyorsa, mikroflora**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** herhangi bir azot ilavesine gerek kalmaksızın bu kaynağı kullanır. Şayet substrat**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** azotça fakirse, ayrışma çok yavaş gerçekleşir ve azot ilavesi ile uyarılır. Baklagil dokuları gibi azotça zengin maddeler çok hızlı metabolize edilir. Yarayışlı azot kapsamı çok düşük olan mineral topraklarda, karbonhidrat ayrışma oranlarının maksimum düzeylerine ulaşmak olası değildir.

Bitki dokularının genel olarak benzer C kapsamına sahip olmaları (Kuru ağırlığın yaklaşık % 40'ı) nedeniyle, onların azot kapsamı C/N**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** oranları ele alınarak kıyaslanır. Böylece düşük azot kapsamı olan bitki dokuları geniş C/Noranına sahip olduklarından ayrışmaları da yavaş olur.

Mineralizasyon sırasında, az miktarda azot içeren maddelerin C/N**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** oranlarında zamanla azalma görülür. Bunun nedeni, ayrışma sonucu karbonun CO₂ halinde kaybı, azotun ise organik kombinasyonda daha uzun süreli kalışıdır. Toprağın C/N oranı, onun karakteristik denge değerlerinden birisidir. Humus için bu değer kabaca 10/1 şeklindedir. Bu kritik oran, mikrobiyal komünitenin dinamik dengesini yansıtır, çünkü benzer olarak mikrobiyal hücrelerin ortalama kimyasal bileşimi benzer orana sahiptir. Bir kural olarak, mikrobiyal hücre 5 ile 15 kısım karbona karşılık, 1 kısım azot içerirse de hakim aerob floranın ortalama C/N oranı 10/1 dir. Anaerobiyosiz**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** yolu ile popülasyonda bir değişim veya daha ileri düzeyde ayrışmaya dirençli fraksiyonların birikimi, humusun C/N denge değerini değiştirebilir. Toprağa geniş C/N oranlı kalıntıların karışması sonucu, mikroflora**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ayrışmayı ve gelişmeyi sağlamak amacı ile ortamdaki anorganik**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** formdaki yarayışlı azotu kullanır ve organik kompleksler halinde bağlar. Aerobik komünitenin % 50 C ve % 5 N içerdiği varsayıldığında, hücre materyaline 10 ünite C katılabilmesi için, 1 ünite yarayışlı azotun da hücre içeriğine kazandırılması gerekir. Bu şekilde faaliyet gösteren mikroorganizmalar substrat**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** karbonunun üçte birini özümlemesi, diğer 20 ünite karbon CO₂ şeklinde serbest bırakılır. Bu ilk kademede azot kaybı

olmaz, çünkü gereksinim sağlanandan daha fazladır. Ancak CO₂ bırakılması nedeniyle C/N oranı daralır. Başlangıçtaki komünitede populasyonların ölmesi ve ayrışması sonucu serbest kalan azot, bir sonraki populasyonlar tarafından özümленir ve 10 kez daha fazla mikrobiyal karbon sentezlenirken, 20 kez fazla CO₂ serbest kalır, C/N oranı biraz daha daralır. Bu süreç C/N dengesi 10/1 olana değin tekrarlanır. Bu noktada, mineralize olan organik azot mikrobiyal gelişme için daha fazla gereksinilmediğinden anorganik formda kalır. Bundan sonra azot ve karbon mineralizasyonu birlikte ilerler ve humus **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** C/N oranı mikrobiyal hücrelerin kimyası tarafından tayin edilen bir değere ulaşır.

Lignin bakımından zengin doğal maddeler diğerlerine kıyasla mikroorganizmalar tarafından daha zor ayrıştırılır. Bu nedenle bitki dokularındaki lignin **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** miktarı, ayrışmanın şiddeti üzerine C/N **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** oranından daha fazla öneme sahip olabilir. Odun ve talaş kalıntılarının mikrobiyal aktiviteye karşı olan direnci, bu gibi maddelerde ligninin yaygın olmasından kaynaklanmaktadır.

Genç ve özlü dokular, olgun bitki kalıntılarında daha hızlı metabolize olurlar. Bitki yaşına bağlı olarak onun kimyasal bileşimi değişir. Azot, proteinler ve suda çözünür maddeler azalırken, selüloz **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**, lignin **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ve hemiselüloz **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** miktarı artış gösterir.

10.3.5. Organik madde ayrışması sırasındaki değişimler

Kuru maddenin yaklaşık %20 ile 30'unu oluşturan suda çözünebilir fraksiyon **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** öncelikle metabolize olur. Ayrışma hızı oldukça yüksektir. Diğer taraftan selüloz **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ve hemiselülozlar, suda çözünebilir maddeler kadar hızlı ayrışmamakla birlikte, çok fazla da dirençli değildirler. Lignin maddeleri ayrışmaya çok dirençli olduğundan, organik madde ayrışması ilerledikçe görece en yaygın kalıntı kısmını oluşturur.

Bitki kalıntılarında yüksek düzeyde yarıyışlı bileşenlerin metabolizması ile geriye kalan kısımların kimyasal bileşiminde kalitatif bir değişim gözlenir. Organik maddenin ayrışması sırasında gözlenen değişimler Çizelge 10.2' de gösterilmiştir.

Bu bilgilere göre ayrışma ilerledikçe geriye kalan kalıntılarda hidroksil kapsamı azalmakta, buna karşılık lignin **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**, karboksil kapsamı ve katyon **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** değişirme kapasitesi artmaktadır.

Karbonlu maddelerin toprağa karıştırılmasından sonra derhal toprak havasındaki CO₂ düzeyi artmakta ve O₂ miktarı azalmaktadır. Aynı zamanda toprağın oksidasyon **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**-redüksiyon potansiyeli (Eh **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**) daha redüktif koşullara doğru kaymaktadır. Redüksiyon gücündeki artışın

Çizelge 10.2. Yulaf samanında ayrışma sırasındaki değişimler

İnkübasyon süresi (gün)	Lignin %	Hidroksil %	Kimyasal özellikler meq/100g	
			Karboksil kapsamı	K.D.K
0	19.3	7.40	28	25
14	21.8	5.94	24	26
40	28.0	8.03	81	42
88	30.8	5.29	95	47
135	34.3	5.48	113	58
180	39.4	5.59	142	60
244	38.3	4.69	139	82

oranı ve büyüklüğü, ilave edilen substrat **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** miktarı (ve türü) na göre değişmektedir. Redoks potansiyelindeki benzer bir durum su baskını veya su fazlalığı içeren topraklarda gözlenmekte ve çözülmüş oksijen miktarı azalmaktadır.

Topraklardaki kil minerallerinin miktar ve türü de karbon mineralizasyonunu etkilemektedir. Çünkü killer bir çok organik substratları, karbonhidratları ayrıştıran ekstraselüler **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** enzimleri ve hatta bakteriyel hücreleri adsorbe etmektedir. Böylelikle kil mineralleri bir tür C-alıkoyucu görev yaparak ayrışmayı yavaşlatmaktadırlar. Killer yanında ince kum ve silt **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** fraksiyonu da mekanik engeller oluşturarak mikrobiyal hareketi ve enzimlerle substratların yakın temasını engellemektedir.

10.3.6. Anaerobik karbon mineralizasyonu

Aerob C mineralizasyonunun esas ürünleri CO₂, su, hücreler ve humus **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** bileşenleridir. Oksijenin yokluğunda, organik karbon tamamlanmamış bir şekilde metabolize olur. Bunların yakınında ara ürünler birikir ve önemli miktarlarda metan **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** (CH₄) ve daha az olmak üzere hidrojen (H₂) oluşur. Aynı zamanda, anaerobik fermentasyonda enerji üretimi düşüktür. Bundan dolayı ayrışan organik karbonun her bir ünitesine karşılık daha az hücre oluşur. Bunların yanında organik madde ayrışması önemli düzeyde yavaştır.

Bir toprak su altında kaldığında, Aerobik süreçlerden anaerobik süreçlere doğru bir değişim ortaya çıkar. Bu değişim sonucu olarak, bir kısım ürünler birikirken, karbondioksit ilave olarak metan **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ve hidrojen ortaya çıkar. Su bastırılmış çeltik alanlar ile su baskını altında kalan topraklarda, C- mineralizasyonu anaerobik olmasına rağmen, toprağın üst kısmında veya toprak-su sınır yüzeylerinde oksijen bulunur. Bu oksijen, sıvı fazda gelişen algler tarafından biyolojik olarak oluşturulabilir ve yeterli düzeyde yararlı karbonhidratların varlığında, oksijenin çoğu, daha derin sıvı-çamur katmanına ulaşmadan kullanılır. Bu nedenle daha derin katlarda dönüşüm çoğunluk anaerobiktir. Şekil 10.6 da mısır kalıntılarının anaerob ayrışması sonucu ortaya çıkan ürünler görülmektedir.

Şekil 10.6 . Mısır kalıntılarının anaerob ayrışma ürünleri

Ayrışma sırasında geriye kalan bitki kalıntılarının hidroksil kapsamı azalırken, karboksil kapsamı ile katyon **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** değişim kapasitesi artar. Toprağa karbonlu maddeler ilave edildiğinde, toprak havasındaki O₂ derhal azalmaya başlar ve CO₂ miktarı yükselir. Aynı zamanda yükseltgenme-indirgenme (redoks **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**) potansiyeli (E_h **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**) daha indirgen koşullara doğru değişir. İndirgenme gücündeki artışın oranı ve büyüklüğü ilave edilen substrat **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ile değişir. Redoks potansiyelindeki benzer azalma ve oksijen kaybı, su baskını altındaki topraklarda da gözlenir.

Topraklardaki kil miktarı ve tipi C mineralizasyonu üzerine etki yapabilir. Çünkü killerin mikroorganizmalar tarafından üretilen karbonhidrat parçalayan ekstraselüler **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** enzimleri, pek çok organik substratı ve hatta bakteri **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** hücreleri adsorpladığı bilinmektedir. Bu nedenle killer önemli düzeyde C-tutucu kapasiteye sahip olup, varlıkları durumunda ayrışma yavaşlamaktadır.

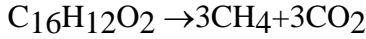
Toprakta organik maddenin ayrışması kil mineralleri yanında toprak organik madde kapsamına, bunun C/N **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** oranına ve su miktarı, havalanma ile çevre sıcaklığına bağlı olarak değişir.

Doğal koşullar ile tarla koşullarındaki ayrışmaya bağlı CO₂ oluşum miktarları farklıdır. Doğal koşullarda C- mineralizasyonuna bağlı CO₂ çıkışı 25 mg CO₂ / gün düzeyinin altında bulunurken, tarım topraklarında bu değer 5-50 mg CO₂ gün⁻¹ toprak⁻¹ düzeylerinde bulunmaktadır. Topraklardaki organik madde miktarı ile O₂ tüketimi ve CO₂ oluşumu arasında önemli ve olumlu bir ilişki saptanmıştır. Ancak CO₂ oluşum miktarı organik maddenin niceliği ile de çok yakından ilgilidir. Daha önce tarım yapılmamış toprakların kültüre alınması ile organik fraksiyonun başlangıçta hızla mineralize olduğu ve daha sonra ayrışma ve mineralizasyon **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** hızının azaldığı saptanmıştır.

Mineralizasyon hızının bu şekilde azalması organik fraksiyonun humuslaşması ve dirençli toprak organik maddesinin oluşması ile ilgilidir. Ancak topraklardaki humus **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** maddesi yavaş da olsa ayrışmaktadır. Tarım topraklarındaki humus fraksiyonun kapsadığı karbonun yılda %2 ile % 5 düzeyinde ayrıştığı bilinmektedir. Bu nedenle toprak verimliliğinin korunması ve devam ettirilmesi için her yıl topraklara organik maddelerin verilmesi gerekmektedir. Tarım topraklarında uygulanan toprak işleme olayları organik fraksiyonların toprağa karıştırılması ve bol havalanma sağladığından ayrışma hızını önemli düzeyde arttırmaktadır, çünkü bu olayda etken olan organizmalar aerob nitelikli mantar **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**, aktinomiset **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ve bakterilerdir.

Gerek humus **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** maddelerinin ve gerekse toprağa yeni katılmış organik maddelerin havalı koşullarda ayrışması ile oluşan son ürünler CO₂, H₂O, NO₃ ve SO₄⁻ tır. Mineralizasyon kavramı toprağa katılan organik kalıntı ve atıkların süratle CO₂ ve H₂O gibi basit son ürünlere dönüşmesini ve bu arada inorganik şekilde besin elementlerinin serbest bırakılmasını tanımlamaktadır. Bu olayda kademeli ayrışmanın oluşturduğu yan ürünlere fazlaca rastlanmaz ve mineralizasyon **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** olayları sırasında hümik madde oluşumu görülmez. **Anaerob** ayrışmada ise oksijen yetmezliğinden dolayı organik fraksiyonlardaki karbonun oksidasyonu yetersiz olduğundan bir çok ara ürün

ortaya çıkar. Anareob ayrışmadaki ana karbonlu ürün olarak metan **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** gazını (CH₄) gösterebiliriz:



Metan gazı çoğunluk bataklık koşullarda ve çöp alanlardaki arazi dolgularında gözlenir. Metan dışında, oksijen yokluğundaki fermentatif reaksiyonlarda çeşitli organik asit ve alkoller ortaya çıkmaktadır. Şekil 10.6 da mısır kalıntılarının silaj **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** yapımı sırasında oluşan anaerobik ayrışma ürünleri görülmektedir.

Su baskını altındaki topraklardakine benzer olarak su altında bırakılan çeltik alanlarında da organik madde ayrışması büyük ölçüde havasız koşullarda gerçekleşir. Ayrışma son ürünü olarak kısmen CO₂ yanında fazlaca metan **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ve daha az olmak üzere hidrojen gazı oluşur. Islak veya su ile doymuş alanlardaki mikrofloranın özelliği olarak organik asitler **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** birikmeye başlar. En fazla gözlenen asitler **asetikHata! Yer işareti tanımlanmamış., formik, bütirik, süksinik ve laktikHata! Yer işareti tanımlanmamış.** asitlerdir. Ayrıca bazı basit alkoller ve karbonil **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** bileşiklerde ayrışma yan ürünleri olarak ortaya çıkar. Havasız koşulların etken olduğu sistemlerde oluşan bu ayrışma türü düşük enerjili olduğundan, organik maddelerin ayrışma hızları yavaştır. Bu nedenle bu tür ortamlarda bitki kalıntıları birikerek çoğunluk asit nitelikli turba veya peat **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** topraklar ortaya çıkmaktadır.

Fermentasyon koşullarının ürünü olarak ortaya çıkan yukarıda tanımlanmış olan ürün ve yan ürünler bu habitatlarda metan **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** oluşturan bakterilere enerji kaynağı görevini görür.

Islak toprakların mikroflorasının fermentatif karakteri nedeniyle organik asitlerin birikimi dikkati çeker. Başat asitler çoğunluk **asetikHata! Yer işareti tanımlanmamış., formik ve bütirik asitlerdir.** Fakat bunların yanında laktik **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ve süksinik asitler de ortaya çıkar. Asitler yanında alkoller ve bir seri karbonil **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** bileşikler de bu gibi ortamlarda oluşur ve bunların çoğu, bu tür habitatlarda metan **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** oluşturan bakterilere enerji ve karbon kaynağı görevi yaparlar. Bu nedenle anaerobik C -dönüşümü organik asitler **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.,** alkoller, metan ve karbondioksit gibi son ürünlerin oluşumu ile karakterize edilir.

10.4. Topraktaki Substrat Tiplerinin Mikrobiyolojisi

Topraklarda organik kalıntıların ayrışma ürünleri veya bitki kök salgıları gibi basit organik bileşikler bulunmakla birlikte, mikrobiyal gelişme için kullanılan doğal substratların çoğu karmaşık bileşiklerdir. Toprak mikroorganizmaları için en yaygın substratlar **selülozHata! Yer işareti tanımlanmamış., hemiselülozHata! Yer işareti tanımlanmamış., ligninHata! Yer işareti tanımlanmamış., kitinHata! Yer işareti tanımlanmamış.** ve **humus**'tur.

Selüloz

Bitki kalıntılarının, özellikle hububat saplarının ve sonbaharda dökülen yaprakların büyük kısmını selüloz **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** oluşturduğundan, bu karbondioksit ayrışması üzerine çok çalışılmıştır ve biyolojik C döngüsünde özel bir önemi bulunmaktadır. Yapı olarak selüloz molekülü β-bağları ile zincir şeklinde birbirine bağlanmış (şeker moleküllerinin 1 ve 4 no'lu karbon atomlarının yanyana bağlanması) doğrusal zincir oluşturan glikoz **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ünitelerinden oluşmuştur. Her molekülde 2000 ile 10 000 veya en fazla 15 000 glukoz ünitesi bulunur. Ancak her bir zincirdeki şeker üniteleri sayıları bitki türüne göre değişim gösterir. Molekül ağırlık tayinleri 200.000 ile 2.4 milyon

arasında değişen değerler vermektedir. Tohumlu bitkiler, algler, pek çok mantarlar ve hatta protozoaların kistleri selüloz içerir. Yüksek bitkilerin selüloz kapsamı sabit olmayıp, bitki yaşı ve tipine göre değişir. Genç çim ve baklagillerde selüloz miktarı en az olarak kuru ağırlığın % 15'i düzeyinde iken, odunsu maddelerde % 50'den fazla olabilir. Pek çok yaygın ürün türünün selüloz kapsamı % 15 ile 45 arasında bulunur.

Nişasta**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ve selülozun her ikisi de aynı yapı bloğu olan şekerlerden (glikoz**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**) oluşmuşlardır. Fakat her iki molekülün bireysel özellikleri nedeniyle nişasta**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** hızlı bir mikrobiyolojik ve enzimatik ayrışmaya daha dirençlidir. Daha da ileri olarak yapısal farklılıkları nedeniyle bu iki karbonhidrat farklı populasyonların uyarılmasında etken olurlar.

10.4.1. Selüloz ayrışmasını yönlendiren faktörler

Topraklar fiziksel ve kimyasal özelliklerindeki farklılıklar nedeniyle, değişik selüloz**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ayrıştırma kapasitesi gösterirler. Maddenin dönüşümünü etkileyen temel çevresel faktörler şunlardır:

- i. Yarayışlı azot düzeyi,
- ii. Sıcaklık,
- iii. Toprak havalanması,
- iv. Toprak ve bitki kalıntı yığınlarının nem düzeyi,
- v. Ortam pH derecesi,
- vi. Diğer karbonhidratların varlığı,
- vii. Bitki kalıntılarının göreceli lignin**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** oranı.

Bitki dokularının bileşenleri ayrışma oranını etkilemektedir. Aynı bir bitkinin değişik kısımları (yaprak, sap) farklı selüloz**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** içerikleri nedeniyle aynı süre içinde farklı düzeylerde ayrışmaktadır (Şekil 10.7). Ayrıca habitattaki fiziksel ve kimyasal karakteristiklerin değişimi, mikrofloranın bileşimini veya selüloz ayrıştıran organizmaların aktivitesini değiştirebilmektedir.

Topraklara anorganik**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** azot verilmesi, selüloz**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ayrışmasını olumlu etkilemektedir. Amonyum veya nitrat**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** tuzları uygun kaynaklardır. Ayrışma oranı, ilave edilen azot derişimi ile orantılıdır. Ancak yüksek azot düzeylerinde, selüloz ayrışması, bu artışa tepkisiz kalmaktadır. İlave edilen azot miktarı her 35 kısım selüloza karşı 1 kısım anorganik azot düzeyine ulaşılmamasından sonra yararlı olmamaktadır.

Çiftlik gübresi ve üre, kazein**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**, amino asitler gibi organik azot bileşikleri, dönüşüm oranını arttırmaktadırlar.

Toprakların nitrat**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** kapsamı ve azot mineralizasyon**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** kapasitesi ve selüloz**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ayrışma oranları arasındaki korelasyonlar, yarayışlı azotun kritik bir faktör olduğunu ortaya koymaktadır. Yüz kısım selülozun ayrışması için üç kısım azotun mikrobiyal protoplazmaya katılması ve her 35 kısım selülozun oksidasyonu için 1 ünite azotun bulunması gerekmektedir.

Selüloz mineralizasyonu ile topraktaki yarayışlı fosfor düzeyi arasında bir korelasyon**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** gözlenmemiştir ve topraklara farklı düzeylerde fosfor ilavesi mineralizasyon**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** üzerine etki etmemektedir.

Şekil 10.7.Mısır yaprakları ve saplarındaki selülozun ayrışması

Selülozun biyolojik olarak tüketilmesi, donma sıcaklıkları civarından 65°C düzeylerine kadar değişmektedir. Selülotik organizmaların her bir çeşidi sıcaklıktan farklı etkilenmektedir. Sıcaklık artışı, enzim **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** aktivitesine etki ettiğinden, mevsimsel ılımanlık substrat **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** döngüsünün şiddetini arttırmaktadır. Bu nedenle nem ve sıcaklık koşullarının değişmesini kontrol eden mevsimler, ayrışma oranını kuvvetle etkilemektedir (Şekil 10.8).

Havalanma, aktif floranın bileşimini kontrol ettiğinden, oksijen kısmi basıncının azalması, selüloz **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** metabolizmasını yavaşlatır. Zayıf drenaj nedeniyle yüksek düzeyde nem kapsayan topraklarda oksijen yetersizliği nedeniyle mantar **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ve aktinomiset **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** sayıları azalırken, selülotik anaerobik bakteriler çoğalır.

Şekil 10.8. Mevsimlerin toprakta selülozHata! Yer işareti tanımlanmamış. ayrışma oranı üzerine etkisi

Nötralden alkali düzeye kadar olan pH'lı çevrelerde, polisakkaritleri hidrolizHata! Yer işareti tanımlanmamış. edecek enzimleri salgılayan pek çok mikroorganizma gelişebilmektedir. Asit koşullarda selülozHata! Yer işareti tanımlanmamış. çoğunluk filamentli mantarlar tarafından kullanılmaktadır. pH 5'in altında süreç hızlı olmakla birlikte, daha düşük hidrojen iyon derişimli topraklarda selüloz daha hızlı ayrışmaktadır.

10.4.1.1. Selüloz ayrıştıran mikroorganizmalar

Selülotik mikroorganizmalar tarla ve orman topraklarında, hayvan gübresinde ve ayrışmakta olan bitki dokuları üzerinde yaygındır. Bu süreçten sorumlu mikroorganizmaların fizyolojik heterojenliği sayesinde ayrışma, oksijenli veya oksijensiz habitatlarda, asit veya alkali pH koşullarında, düşük veya yüksek nem koşullarında ve donma noktasına yakın düzeyden termofilik sıcaklık düzeylerine kadar olan koşullarda gerçekleşebilmektedir.

Selüloz kullanan organizmalar arasında aerob ve anaerob mezofilHata! Yer işareti tanımlanmamış. bakteriler, filamentli mantarlar, bazidiomisetler, termofil bakteriler ve aktinomisetler sayılabilir.

Çizelge 10.3. Selüloz ayrıştıran bazı mikroorganizma cinsleri

Mantar	Bakteri	Aktinomiset
<i>Alternaria</i>	<i>Bacillus</i>	<i>Micromonosporoa</i>
<i>Aspergillus</i>	<i>Cellulomonas</i>	<i>Nocardia</i>
<i>Coprinus</i>	<i>Clostridium</i>	<i>Streptomyces</i>
<i>Fomes</i>	<i>Corynebacterium</i>	<i>Streptosporangium</i>
<i>Fusarium</i>	<i>Polyangium</i>	
<i>Penicillium</i> Hata! Yer işareti tanımlanmamış.	<i>Sporocytophaga</i>	
<i>Polyporus</i>	<i>Vibrio</i>	
<i>Rhizoctonia</i>		
<i>Rhizopus</i>		
<i>Trametes</i>		

Çizelge 10.3'de görüldüğü gibi selülozHata! Yer işareti tanımlanmamış. ayrıştıran mikroorganizmalar içinde mantarlar özel bir öneme sahiptirler. Şayet ortamda yeteri düzeyde azot bulunuyorsa, selüloz uygulamasından sonra mantarHata! Yer işareti tanımlanmamış. türleri sayısal bakımdan önemli düzeyde artmaktadır. Hümik topraklarda selüloz ayrışmasında mantarlar esas görev yaparken, yarı-kurak bölgelerde bakterilerin büyük önemi vardır. Orman birikinti katmanının ayrışmasında ise selülotik bazidiomisetler hakim görev yaparlar.

Aerob, mezofilHata! Yer işareti tanımlanmamış. selülozHata! Yer işareti tanımlanmamış. ayrıştırıcı bakterilerin sayıları bölgeden bölgeye değişim gösterir. Bazen 100'den az, bazen de bir gram toprakta 10 milyondan fazla olabilirler.

Selüloz ayrıştırıcı bakteriler içinde *Cytophaga* türü oldukça yaygındır. Uzun, esnek yapılı ve iğ şeklini andıran bu organizmalar gelişmeleri sırasında önemli şekil değişiklikleri gösterirler (Şekil .10.9).

Şekil 10.9 . *Cytophaga*'nın şekil değişimleri

Bu bakteriler, çiftlik gübresi ve saman yığınlarında ve toprakta yaygın bir tür olup, polisakkaritlerin aerob ayrışmasında önemlidir. *Sporocytophaga* cinsi de selüloz **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** kullanabilir. Bunların dışında *Pseudomonas*, *Vibrio* ve *Bacillus* türleri de selüloz kullanan organizma gruplarıdır. Aktinomisetlerden *Micromonosporoa*, *Streptosporangium* ve *Nocardia* selülotik organizmalardır. Aerob, mesofil floranın selüloz ayrıştırma gücünü kontrol eden önemli bir faktör çevre pH düzeyidir. pH'sı 6.5-7.0 arasında olan topraklarda, aktif populasyon **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** vibrio, özellikle *cytophaga*'lardır. pH 5.5'tan daha asit topraklarda hakim flora **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** filamentli mantarlardır.

Selüloz ayrıştıran bazı mikroorganizmalar, bu işlevi tümüyle oksijensiz koşullarda gerçekleştirebilirler. Selülozun anaerob ayrışmasının ürünleri, büyük miktarlarda etanol ve asetik **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**, formik, bütirik, laktik **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** asit gibi organik asitlerdir. Selülotik anaerob mikroorganizmaların saf kültür halinde izolasyonları ve muhafazaları zordur. Bazı spor **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** oluşturan mezofiller, spor oluşturan termofil formlar ve spor oluşturmayan çubuklar, koklar ile bazı aktinomisetler ile bazı mantarlar anaerobik olarak gelişerek selüloz **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ayrıştırması yapabilirler. Bu tür organizmalar aeroblar gibi asitliğe karşı duyarlı olmayıp, 4.3 gibi pH düzeylerinde bulunurlar. Doğadaki en yaygın anaerobik selüloz fermentasyonu yapan üyeler, *Clostridium* cinsi içinde yer alırlar. Bu bakteriler toprakta, kompost **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ve hayvan gübresinde, nehir çamurları ve kanalizasyon atıklarında bulunurlar. *Clostridium* türlerinin çoğu selülotik olup, toprak süspansiyonununun 10 dakika 80 °C'de ısıtılması ve daha sonra selülozlu besin ortamına aşılup anaerobik olarak inkübe edilmesi yoluyla izole edilirler. Termofilik selülotik bakteriler **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** toprak ve çiftlik gübresinden kolayca elde edilebilir. Selüloz

kaynağı olarak filtre kağıdı, anorganik **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** tuzlar ve kalsiyum karbonat içeren besin yerine toprak veya çiftlik gübresinden sağlanan aşı süspansiyonu verildikten sonra 65 °C'de inkübe edilir. Bakterilerin gelişmesi selüloz ayrışması ile filtre kağıdının parçalanması ve kahverengi-sarımsı renk ile anlaşılır. Ancak termofilik formların doğada az bulunuşu nedeniyle selüloz ayrışmasındaki rolleri önemli değildir.

10.4.1.2. Selüloz ayrışmasının biyokimyası

Aerob bakteriler selülozu başlıca iki ana ürüne çevirirler:

- Karbondioksit
- Hücre maddeleri

Bu olayda karbonlu ara ürünlerin birikiminin önemli düzeyde olmadığı gözlenir. Ancak bazı grupların selüloz **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ayrışması sırasında ana ürünler yanında çok az miktarda organik asitleri serbest bıraktığı gözlenmiştir. Mezofilik ve termofilik anaerobların selüloz çevrimi tümü ile farklıdır. Bu organizmalar, basit substratları bile kullanmakta yetersiz olduklarından, bir grup organik asit son ürün olarak serbest kalır. Selülozun anaerob ayrışma ürünleri Çizelge 10.4'de görülmektedir.

Çizelge 10.4. Selülozun anerobik ayrışma ürünleri

Bakteriler	Ürünler
<i>Clostridium cellobioparum</i> (mezofil Hata! Yer işareti tanımlanmamış.)	CO ₂ , H ₂ , etanol, asetik Hata! Yer işareti tanımlanmamış. , laktik Hata! Yer işareti tanımlanmamış. ve formik asitler
<i>Clostridium thermocellum</i> (Termofil)	CO ₂ , H ₂ , etanol, asetik Hata! Yer işareti tanımlanmamış. , laktik Hata! Yer işareti tanımlanmamış. , formik ve süksinik asitler

İlk mikrobiyologlar, bakteriyel fermantasyon sırasında metan **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** oluştuğunu belirtmişlerdir, fakat modern araştırmalar selülotik anaerobların hiçbirinin metan üretmediğini göstermektedir. Metan oluşumu sekonder olarak işleve katılan ve organik asitleri metabolize eden bakterilerin faaliyeti ile ilgilidir.

Selüloz parçalanmasının başlangıcındaki basamak polimerin enzimatik hidrolizidir. Bir grup farklı enzimleri içeren bu enzimlere **selülaz** adı verilmektedir. Selülaz enzimleri, çözünür olmayan selülozu basit, suda çözünür mono ve disakkaritlere dönüştürür. Bunu takip eden basamak, basit şekerlerin aeroblar tarafından CO₂'e ve anaeroblar tarafından da alkol **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ve organik asitlere çevrimidir.

Mikrobiyal hücre, selüloz **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** molekülü için geçirimsiz olduğundan, organizma C- kaynağını yarayışlı kılmak için hücre dışı (ekstraselüler **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**) enzimleri salgılamak durumundadır. Hücre dışı katalizleme hidrolitik olarak oluşmakta ve çözünmez olan maddeler, çözünür şekerler şeklinde hücre zarından girebilmektedir.

Selülaz enzim **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** sistemi, birbirlerine bir şeker ünitesinin 1 no 'lu karbonu ile yanındaki şeker ünitesinin 4 no'lu karbon ünitesinin birbirine bağlanması ile oluşan bileşikleri hidroliz **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** yolu ile katalizleyen enzimlerdir. Bu tür bağlara β -tipi (β -(1-4)) bağları adı verilir. Bu strüktür **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** aşağıda görülmektedir.

β - (1-4) bağları strüktürü

Bu grup içinde yer alan sellobioz, sellotrioz, sellotetroz ve selüloz **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**, iki, üç, dört ve bir çok glikoz **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ünitesinden oluşmuştur. Çeşitli glikoz yapı bloklarından oluşan bileşiklere **oligomer** **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** adı verilmektedir.

Selülozun hücre zarından geçebilecek küçük glikoz **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ünitelerine ayrışmasında etken olan katalitik sistem, üç tip enzim **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** içermektedir:

- a. Henüz tam olarak tanımlanmamış ve C_1 olarak bilinen bir enzim **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**,
- b. β - (1-4) glukanaaz veya C_x ,
- c. β - glukozidaz.

β C_1 enzimi parçalanmaya uğramamış, doğal selüloz **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** üzerine etki eder. Bu enzim **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** gerçek selülotik organizmalarda bulunur. Tek bir populasyonun tek bir C_1 enziminden daha fazla enzim salgıladığı da saptanmıştır.

β (1-4) glukanaazlar genel olarak C_x olarak bilinen ve doğal sellülozu değil de, kısmen ayrılmış polimerleri hidroliz **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** eden enzimlerdir. Bu tip enzimler, yaygın bakteri **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**, mantar **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ve aktinomiset **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** gruplarında bulunur. Bu enzim **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** grubu sellotetroz ve sellotrioz gibi oligomer **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** strüktürleri üzerine aktivite gösterir. Diğer taraftan oligomerler üzerindeki hidrolizin hızı, yüksek molekül ağırlıklı bileşiklerden daha yavaş olmaktadır. Bu reaksiyon tipi çözünmez nitelikli substrata suyun ilave olması ve köprülerin kırılmasına dayanır. Selülaz sistemi içindeki bireysel enzimlerin aktiviteleri toprakta doğrudan ölçülebilir. Bu amaçla ayrılmamış ve kısmen ayrılmış selüloz **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**, belli miktardaki topraklara katılarak inkübe edilir ve oluşan şeker miktarı tayin edilir.

Selüloz ayrışmasının biyokimyası ile ilişkili önemli bir faktör kil mineralleridir. Selüloz ve onun ayrışma ürünleri kil mineralleri tarafından adsorplanabilir. Yüksek molekül ağırlıktaki polisakkarit **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** türevleri, kısa zincirli bileşiklerden daha az düzeyde adsorplanır. Bunun yanında bazı kil türleri etkili enzimleri inaktif duruma sokabilirler.

10.4.2. Hemiselüloz

Hemiselüloz olarak tanımlanan polisakkaritler, toprağa selülozdan sonra ikinci düzeyde yüksek miktarlarda katılan ve mikroorganizmalar için önemli besin ve enerji kaynağı sağlayan ana bitki bileşenleridir. Bu maddelerin bileşimine giren organik moleküllerin etkisi ile toprakta ayrışma hızları farklıdır. Hemiselülozlar strüktürel olarak selüloza benzemez. Bu polimerlerin tam kimyasal hidrolizi ile monosakkaritler (basit şekerler) ve bunların ürünleri olan üronik asitler ortaya çıkar.

10.4.2.1. Hemiselüloz kimyası

Hemiselülozlar, ilgili oldukları şeker adının sonuna bir "an" eki alarak tanımlanırlar. Örneğin "glik (glyc-) an"= glikan gibi. Bu sınıfa giren polimerler iki genel gruba ayrılır:

- Homoglikanlar**: Ksilan, Mannan, Galaktan gibi homoglikanlar ksiloz, mannoz veya galaktoz ünitelerinden oluşmuşlardır. Anlaşılacağı gibi bunlar yapılarında tek bir tür monosakkarit içerirler.
- Heteroglikanlar**: Yaygın polisakkaritler olup bir çeşitten daha fazla monosakkarit veya üronik asit içerirler. İki ile dört veya beş, altı farklı şeker bir molekülde birlikte bulunabilir.

Heteroglikanlar, polimerdeki şekerler veya üronik asitler esas alınarak isimlendirilir. Örneğin *arabinogalaktanlar* gibi. Bu tür polimerlerin *glikomannanlar*, *arabinoksilanlar* strüktürleri oldukça komplekstir. Bazıları çeşitli şekerlerin 50 ile 200 şeker ünitesinden yapılmıştır. Selülozun zincirli yapısına karşılık, hemiselülozlar dallanmış bir yapı gösterirler (Şekil 10.10).

Şekil 10.10. Polisakkaritlerde gözlenen zincir veya dallanmış strüktür
Her daire bir monosakkarit veya üronik asit ünitesidir

Birkaç şeker ve üronik asit hemiselülozlarda yaygındır, bunlar:

- Pentozlar (Beş karbonlu şekerler): Ksiloz, arabinoz
- Heksozlar (Altı karbonlu şekerler): Mannoz, glikoz ve galaktoz

c. Üronik Asitler: Gluküronik**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ve galaktronik**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** asitler.

Hemiselülozların bileşimini oluşturan monomerler Şekil 10.11 de gösterilmiştir.

Şekil 10.11 . Hemiselülozların bileşenlerinin strüktürleri

10.4.2.3. Hemiselülozların ayrışması ve ilgili mikroorganizmalar

Bitki dokuları toprağa karıştığında, hemiselüloz**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** kısımların başlangıçtaki ayrışmaları hızlı olmakla birlikte, bunu takip eden ayrışma olayları oldukça yavaş yürümektedir. Ayrışma hızındaki bu değişim, büyük olasılıkla hemiselüloz fraksiyonlarının heterojen yapısı ile ilgili bulunmaktadır. Ayrışma sırasında karbon, hücresel protoplazmaya çevrilmekte ve bir kısmı da CO₂'e dönüşmektedir. Çavdar samanı ile yapılan denemeler, buradaki hemiselüloz yapısında bulunan ksiloz ve arabinoz**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** bileşenlerinin toprakta hızla parçalandığını ve 56 gün sonra ksilozun yalnızca % 5'inin geriye kaldığını göstermektedir. Hemiselüloz ayrışması çevrenin fiziksel, kimyasal koşullarına, ortam pH'sına ve sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Oksijen düzeyi azaldıkça ayrışma yavaşlamakta ve anaerob çevrelerde çok zor ilerlemektedir.

Aerob ve anaerob mikroorganizmaların çoğu, hemiselülozları gelişme ve yeni hücre sentezi için kullanma yeteneğindedir. Çizelge 10.5.'de bu organizmalar verilmiştir.

Çizelge 10.5. Hemiselülozu ayrıştıran organizmalar

Organizma	Substrat
Bakteriler <i>Bacillus</i> <i>Cytophaga</i> <i>Pseudomonas</i> <i>Streptomisetler</i>	Mannan, galaktomannan, ksilan Hata! Yer işareti tanımlanmamış. Galaktan Ksilan Mannan, ksilan Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
Mantarlar <i>Alternaria</i> <i>Aspergillus</i> <i>Fusarium</i> <i>Penicillium</i> Hata! Yer işareti tanımlanmamış.	Arabinoksilan, ksilan Hata! Yer işareti tanımlanmamış. Araban, mannan, arabinoksilan Araban, arabinoksilan Araban, mannan

Hemiselülotik bileşiklerin içinde en önemlilerinden biri ksilandır. Çünkü bu bileşik çayır ve odunsu bitkilerin toplam karbonhidrat kapsamının büyük kısmını oluşturur. KsilozHata! Yer işareti tanımlanmamış. içeren karbonhidratların bu nedenle toprakta ayrışmasının önemi fazladır. Topraklar ksilanHata! Yer işareti tanımlanmamış. ayrıştırabilen çok sayıda mantarHata! Yer işareti tanımlanmamış., bakteriHata! Yer işareti tanımlanmamış. ve aktinomisetHata! Yer işareti tanımlanmamış. içerir. Alkali koşullarda ve çürümekte olan saman ve ahır gübresinde *bacillus* suşları başlangıçta hakim durumda iken, asit koşullarda ayrışmanın başlangıç kademelerinde filamentli mantarlar dominanttır. Yüksek sıcaklıklarda (60-65°C) termofil aerob sporHata! Yer işareti tanımlanmamış. oluşturan çubuklar, hızlı ksilan ayrışmasında etkilidirler.

Ksilan ayrışmasında etken olan toprak ksilanazHata! Yer işareti tanımlanmamış. aktivitesi, ürün ve toprağa sağlanan organik maddeye göre değişiklik göstermektedir. Özellikle çiftlik gübresi ile gübrelenen arazilerde aktivitenin yüksek olduğu görülmüştür. Mannan diğer önemli bir hemiselülozHata! Yer işareti tanımlanmamış. olup, mannozün polimerik bir kombinasyonudur. Mannanlar toprakta hızlı metabolize olurlar. Bitki dokularındaki mannanları kullanan mikroorganizmalar içinde bakterilerden *Bacillus* ve *Vibrio*, bir grup aktinomisetHata! Yer işareti tanımlanmamış. ve mantarlardan *Aspergillus*, *Penicillium*Hata! Yer işareti tanımlanmamış., *Rhizopus*, *Trichoderma*, *Chaetomium* ve *Zygorhynchus* sayılabilir.

Galaktanlar, bazidiomisetler, aktinomisetler ve bir grup mantarlar için uygun karbon kaynaklarıdır, ancak galaktanlar ksilanHata! Yer işareti tanımlanmamış. ve mannanlardan daha yavaş ayrışır.

10.4.2.3. Hemiselüloz ayrışmasının biyokimyası

Hemiselüloz ayrışmasında pek çok farklı enzimHata! Yer işareti tanımlanmamış. yer alır. Bir kural olarak üç tip katalizörHata! Yer işareti tanımlanmamış. bu mekanizmada işlev görür. Bunlar;

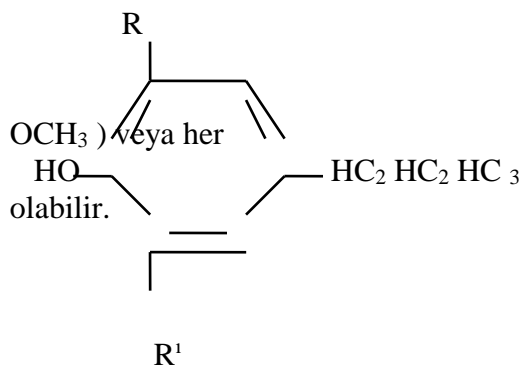
- Endo-Enzimler: Polimerlerdeki yapı blokları arasındaki bağları çözerler,
- Ekso-Enzimler: Polisakkarit zincirindeki tek dimer veya monomerleri çözerler,
- Glikozidazlar: Bunlar hemiselülozHata! Yer işareti tanımlanmamış. veya polisakkaritHata! Yer işareti tanımlanmamış. veya gruplarını çözen enzimler tarafından üretilmiş oligomerHata! Yer işareti tanımlanmamış. veya disakkaritleri parçalayarak, basit şekerler veya üronik asitleri serbest bırakırlar.

Hemiselülozlar toprakta bir çok mikroorganizma grubu tarafından ayrıştırılabilmektedir. Hemiselülaz grubu enzimler ayrıştırdıkları substrata göre isimlendirilir. Örneğin ksilan**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ayrıştıranlar ksilanaz**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**, mannan ayrıştıranlar mannaz**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** gibi. diğer enzimler pektinaz**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ve kitinazdır.

10.4.3. Lignin

Bitki dokularının en yaygın üçüncü bileşeni lignindir. Ayrıca lignin**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** benzeri polimerler *Humicola*, *Aspergillus* ve *Glioladium* türünden mantarlarda da bulunur. Lignin dokularda selülozla birlikte lignoselüloz**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** şeklinde bulunur. Kimyasal olarak üniform yapıda olmayıp bitki türüne göre değişen strükture sahiptir. Yapısında aromatik**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** halka içermesi nedeniyle topraktaki ayrışması bütün diğer doku bileşenlerinden daha yavaştır. Temel struktürü fenil propan ünitelerinden oluşan bir polimer**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** yapısında olmakla birlikte, alifatik hidroksil ve karbonil**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** gruplarını da içerir. Örneğin iğne yapraklı (konifer**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**) bitki dokusundaki lignin, vanilin**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ve p-hidroksibenzaldehid içermesine karşın, odunsu dikotiledonlarda vanilin ve syringaldehid bulunmaktadır.

Ligninin önemli yapı taşları koniferil**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**, sinafin**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ve kumar**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** alkollerdir. Tahıllarda bulunan lignin**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** kumar, sinafin ve koniferil alkolden oluşurken, iğne yapraklılarda koniferil alkol**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**, geniş yapraklılarda ise sinafin ve koniferil alkol hakimdir (Şekil 10.12). Ligninin temel strüktrü fenilpropan (C₆-C₃) tipi strüktrü**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** olarak tanımlanır.



R,R= veya R bir H, ve R bir metoksil**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** (-

ikisi de metoksil**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**

Üniteler birbirine kuvvetli eter bağları ile (--C-O-C-) bağlanmıştır.

Şekil 10.12. Lignin oluşumundaki temel yapı ünitesi

Topraklara hem kökler, hem de toprak üstü bitki dokularından önemli miktarda ligninleşmiş madde katılmaktadır. Diğer doku bileşenleri ile kıyaslandığında bu maddenin ayrışması çok yavaştır. Selülozla kıyaslanacak olursa, topraktaki selüloz**Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ayrışması ligninden üç kat daha hızlı olmaktadır. Lignini ayrıştırma gücündeki mikroorganizmalar da fazla değildir.

Bakterilerden aerob, gram negatif **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ve spor **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** oluşturmayan çubuklar, örneğin *Pseudomonas* ve *Flavobacterium* lignini ayrıştırabilir. Ancak lignin **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ayrışmasında en etken organizmalar mantarlar, özellikle bazidiomisetler ve askomisetlerdir.

Ligninin son derece karmaşık polimer **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** yapısı ve azot içermemesi yavaş ayrışmasındaki en önemli nedenler olarak tanımlanabilir (Şekil 10.13).

Şekil.10.13. Ladin ligninin şematik formülü. MeO metoksil **Hata! Yer işareti tanımlanmamış. (CH_3O) gruplarını göstermektedir**

Dirençli yapısına karşın lignin **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ayrışmakta, ancak ilk parçalanma ürünleri mikroflora **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** tarafından hemen kullanılmadığından toprakta birikmekte ve tekrar polimerizasyon **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** reaksiyonlarına girerek hümin maddelerinin oluşmasında etken olmaktadır. Bu nedenle toprak humusunun oluşumu ile ligninleşmiş bileşiklerin ayrışması ve ayrışma ürünleri önem taşımaktadır. C^{14} etiketli lignin ile yapılan lignin ayrışması deney sonuçları Şekil 10.14'de görülmektedir.

Şekil 10.14. CO₂ oluşumu izlenerek lignin Hata! Yer işareti tanımlanmamış. ayrışmasının gözlenmesi

Lignin ayrışması sırasında bazı kimyasal değişimler ortaya çıkar. Örneğin metoksil Hata! Yer işareti tanımlanmamış. oranında azalma olur. Saflaştırılmış ligninle mikrobiyal kültürlerde yapılan çalışmalarda, ayrışmaya bağlı olarak bazı basit aromatik Hata! Yer işareti tanımlanmamış. bileşiklerin ortaya çıktığı gözlenmiştir. Bunlar vanilik, p-hidroksibenzoik, p-hidroksisinamik, ferulik, sirinjik ve 4-hidroksi-3-metoksifenilpirüvik asitler ile vanilin Hata! Yer işareti tanımlanmamış., dehidrovanilin, koniferil Hata! Yer işareti tanımlanmamış. aldehyd, p-hidroksisinamik aldehyd, sirinjikaldehyd, guayasilgliserin v.b aldehyd bileşiklerdir. Bu bileşiklerin hepsi benzen halkası ve metoksil (-OCH₃), karboksil (-COOH), aldehyd (-CHO) veya hidroksil (-OH) grupları içermektedir. Ligninin mikrobiyal metabolizması Şekil 10.15’de tanımlanmıştır.

Şekil 10.15 . Ligninin mikrobiyal metabolizması

Mikrobiyal ligninHata! Yer işareti tanımlanmamış. metabolizması üzerine yapılan çalışmalar, metoksilHata! Yer işareti tanımlanmamış. gruplarının veya sodyum lignosülfonat'ın kültür ortamından kullanılarak kaybolmasını kriter olarak almaktadır. Bazidiomisetlerin çoğu lignini ayrıştırma yeteneğindedir, fakat reaksiyon oldukça yavaştır. Aerob lignin ayrışmasına ılımlı iklimlerde çeşitli yüksek mantarlar katılmaktadır (Çizelge 10.6).

Çizelge 10.6. Lignin ayrıştıran bazı yüksek mantarlar

Organizma	İnkübasyon zamanı (gün)	Ayrışma oranı (%)
<i>Poria taxicola</i>	37	9.4
<i>Pleuratusostreatus</i>	57	11.4
<i>Polyporus fumosus</i>	50	13.5
<i>Fomes coficinalis</i>	79	21.1
<i>Trametes heteromorpha</i>	88	21.7
<i>Collybia velutipes</i>	88	22.3

Mikroorganizmaların ligninHata! Yer işareti tanımlanmamış. ayrıştırma yeteneğini (lignoklastikHata! Yer işareti tanımlanmamış.) tayin etmede iki yöntem uygulanmaktadır. Bunlardan birincisi, sterilHata! Yer işareti tanımlanmamış. bir bitki dokusunu araştırılacak organizma ile saf kültür halinde inkübasyona almak, diğeri ise saflaştırılmış lignin ortamları kullanmaktır. Örneğin *Coriolus* ve *Pleurotus* kültürde saflaştırılmış lignini kullanma yeteneğindedir. Lignini etkileyen mantarların çoğu selülozu da kullanabilmektedir. Bir çalışmada toprakta yerleşik bulunan 46 bazidiomisetten 44'ünün her iki maddeyi de ayrıştırabildiği saptanmıştır. Ayrışmakta olan bitki dokularında filamentli mantarlar da saptanmış olmasına karşın, bunların lignini kullanarak mı, yoksa bazidiomisetlerin salgıları yardımı ile mi geliştikleri, çok açık değildir. Saf kültürler ile yapılan çalışmalar alçak mantarların poliaromatik maddeleri nadiren metabolize edebildiğini göstermiştir. Örneğin *Aspergillus*, *Fusarium* ve *Penicillium*Hata! Yer işareti tanımlanmamış. türlerinin buğday samanından türetilmiş lignini kullanabildikleri gözlenmiştir (Çizelge 10.7).

10.5. Basit Organik Bileşiklerin (Monomer) Toprakta Ayrışması

Hücre bileşenlerinin birçoğu toprak mikroorganizmalarının pek çoğu tarafından hızla kullanılabilir şekildedir. Şekerler, amino şekerler, organik asitlerHata! Yer işareti tanımlanmamış. ve amino asitler toprağa hücre protoplazmasından serbest bırakılır veya daha karmaşık bileşiklerin ayrışması yolu ile ortaya çıkarlar. Bütün bu maddelerin hepsi toprak

mikroflorası tarafından hızlı bir şekilde kullanılır. Sonuçta topraktaki mikrobiyal aktivite artarken doğal organik ayrışması da artar.

Toprak mikroorganizalarının büyük bölümü, karbonhidrat ve proteinlerin oksidasyonu sırasında, oluşan organik asitlerin çoğunu kullanabilir. Bu nedenle topraklardaki organik asitlerin miktarı genellikle azdır. Bu gibi maddeler daha önceden belirtildiği gibi su ile doygun havasız koşullarda daha fazla bulunurlar.

Çizelge 10.7. Toprak hidrolizatlarındaki çözünür şekerler (mg toprak⁻¹)

Bileşik	Çayır örtüsü	Tın	Podzol B ₂ Horizonu
Galaktoz	0.8	0.1	1.8
Glikoz	2.3	0.1	3.9
Mannoz Hata! Yer işareti tanımlanmamış.	0.7	0.03	1.8
Arabinoz	0.6	0.2	1.0
Ksiloz Hata! Yer işareti tanımlanmamış.	0.7	0.1	1.0
Riboz	0.1	0.2	0.7
Fükoz	0.2	0.2	0.7
Ramnoz	0.4	0.1	1.0
% Organik Madde	12.1	1.4	13.9

Radyoaktif etiketlenmiş karbon izotopları (C¹⁴) içeren asetat bileşikleri ile yapılan deneyler 6 ile 9 saat içinde toprağa katılan asetatın % 22-30 düzeyinde CO₂'e oksitlendiğini göstermiştir. Geriye kalan kısım saptanamamış olup, büyük ölçüde mikrobiyal protoplazmaya katıldığı veya oksidatif olmayarak metabolize olduğu ve toprak organik fraksiyonunda biriktiği düşünülmektedir.

Suda çözünür şekerler, toprakta küçük miktarlarda bulunur fakat çözünmeyen formların (polimerler) yapısında yer alırlar. Herhangi bir organizma bu polimerleri etkilediğinde şekerler serbest kalır ve enerji sağlamak için organizmalar tarafından kullanılır. C¹⁴ ile etiketli glikoz **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ile yapılan çalışmalar, bu maddenin % 75'inin 3 ay içinde CO₂'e çevrildiğini göstermiştir.

Amino asitlerin çoğu da toprakta serbest durumda bulunmazlar. Büyük bir kısmı, proteinlerin polimerizasyonunda veya hümitik maddeler ile kompleks formlar oluştururlar. Aspartik asit **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**, glutamik asit **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**, valin **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ve leusin **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** gibi toprakta serbest olarak bulunan amino asitlerin kapsamları 2-387 mg g⁻¹ sınırları arasında saptanmıştır. Amino asitler toprağa katıldıklarında ilk 48 saat içinde büyük ölçüde ayrılmakta ve 96 saat sonra tümüyle ortadan kaybolmaktadır. Ancak amino asitlerin tümü bu özelliği göstermeyip, bunlardan lizin ve tirozin ayrılmaya oldukça dirençlidir. Aerob koşullarda amino asitler, amonyak **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ve karbondioksit ayrışırken, havasız koşullarda büyük miktarlarda uçucu yağ asitleri ve amonyak oluşmaktadır. Amino asitlerin ayrışmasına ilişkin bir deneyin sonuçları Şekil 10.16'da görülmektedir.

Şekil 10.16. Amino asitlerin toprakta ayrışmasının CO₂ oluşumu ile tanımlanması
10.6. Karmaşık Organik Bileşiklerin (Polimerler) Ayrışması

Organik maddelerin bileşimini oluşturan karmaşık moleküler strüktürlü polimerler, çoğunluk suda çözünmezler ve molekül büyüklüğü nedeniyle de mikroorganizmalar tarafından doğrudan kullanılmayan bileşiklerdir. Bu bileşikler ekstraselüler **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** enzimler tarafından ayrıştırılır ve mikroorganizmalar tarafından özümleden önce absorbe olurlar.

10.6.1. Nişastanın ayrışması

Nişasta **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**, bitkilerin en yaygın besin maddesi kaynağı olan bir heksoz polimerdir. Nişasta bitkilere göre farklı fiziksel özellikler gösterse bile, kimyasal bakımdan oldukça benzer özelliktedir. Fotosentez sonucu büyük miktarlarda yapraklarda oluşmasına karşın ksilem **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**, floem **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ve korteks **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** dokusunda dağılır, meyve, tohum, toprakaltı rizomları gibi çeşitli organlarda birikir. Nişasta, glikozdan oluşan iki polimerin, amiloz ve amilopektinin karışımıdır. Amiloz, glikoz **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ünitelerinin 1-4 glikoz bağları ile oluşturduğu zincir strüktüre sahiptir.

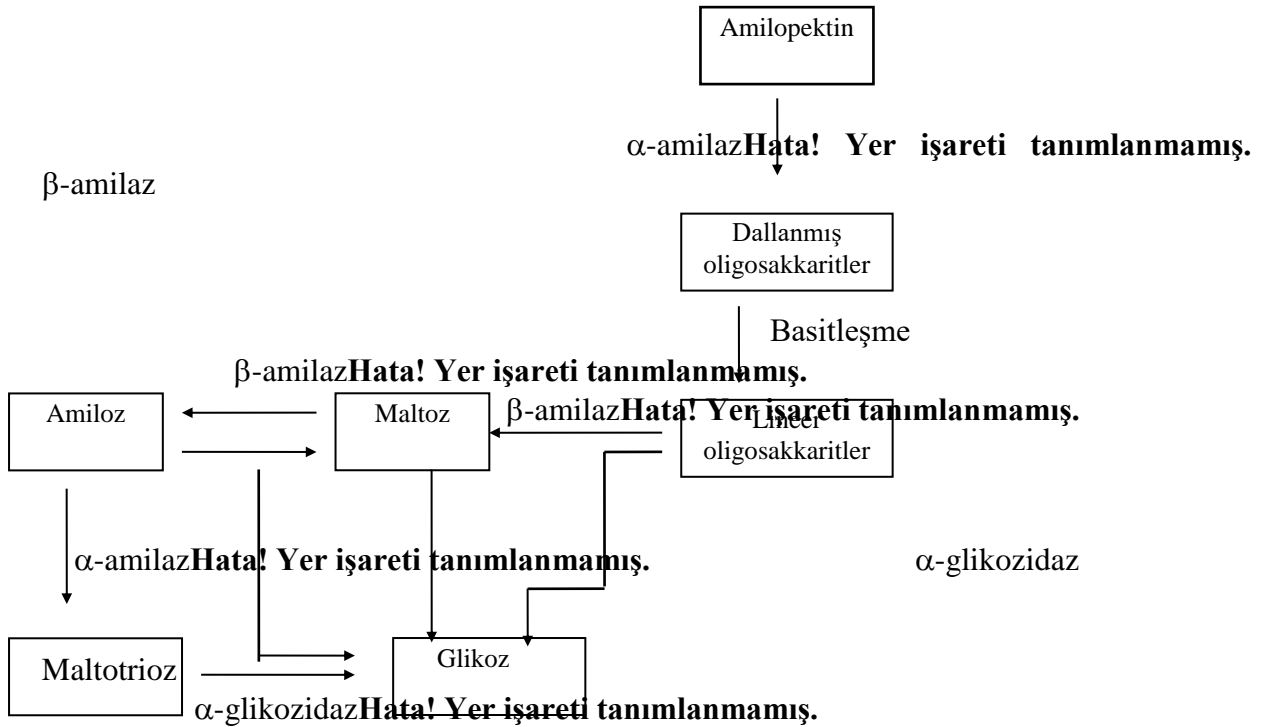
Amilopektin aynı tip bağlantı ile bir zincir oluşturmakla birlikte, 1-6 bağları ile bir yan zincir de oluşturur. Laboratuvar koşullarında, topraktan izole edilen birçok bakteri **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**, mantar **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ve aktinomiset **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** α -amilaz olarak tanınan ekstraselüler **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** bir enzim **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** oluşturarak nişastayı hidrolize edebilmektedir. **α -amilaz** **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**, hem amilozu hem de amilopektini, bir kaç şeker ünitesinden oluşan dekstrine indirger. **β -amilaz** **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** enzimi ise amilozu maltoza, amilopektini de maltoz **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ve dekstrin karışımına redükte **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** eder. Maltoz ise sonuçta **β -glikozidaz** **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** enzimi tarafından glikoza hidroliz **Hata! Yer**

işareti tanımlanmamış. edilir. Pek çok karmaşık organizma grupları nişastayı karbon ve enerji kaynağı olarak kullanabilmekte ise de, yalnızca bir kaç toprak organizması nişastayı organik asitlere ve karbondioksite ayrıştırabilmekte, diğer mikroorganizmaların çoğu yalnızca dekstrinlere çevirme işlemi yapabilmektedir. Çizelge 10.8’de nişastayı kullanabilen cinslere ilişkin örnekler verilmiştir.

Çizelge 10.8. Nişastayı kullanabilen bazı mikrobiyal gruplar

Bakteriler	Aktinomisetler	Mantarlar
<i>Bacillus flavobacterium</i>	<i>Micromonospora</i>	<i>Aspergillus</i>
<i>Chromobacterium micrococcus</i>	<i>Nocardia</i>	<i>Fomes</i>
<i>Clostridium pseudomonas</i>	<i>Streptomyces</i>	<i>Fusarium</i>
<i>Cytophaga</i>		<i>Polyporus Rhizopus</i>

Bakteriler arasında gram pozitif ve gram negatif **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** cinsler, spor **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** oluşturanlar veya sporsuzlar, aerob veya mutlak anaeroblar gibi pek çok fizyolojik olarak farklı gruplar bulunabilmektedir. Nişasta **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**, pek çok aktinomiset **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** için mükemmel bir C kaynağıdır. *Streptomyces*, *Nocardia* ve *Micromonospora* suşları büyük ölçüde bu polisakkaritleri kullanırlar. Filamentli mantarların bir çoğu, hidrolitik enzimleri salgılayarak polisakkaritleri ayrıştırırlar. Nişastanın glikoza enzimatik çevrimi Şekil 10.17 de görülmektedir.



Şekil 10.17. Nişastanın enzimler yolu ile ayrışması

10.6.2. Pektik maddeler **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**

Pektik maddeler **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**, bitki dokularının küçük bir kısmını oluşturur. Ancak bu polisakkaritlerin önemi, topraktan kaynaklanan hastalıklar ile diğer patojenlere karşı etkileri ve bitkinin fiziksel strüktürüne katkılarından kaynaklanmaktadır.

Pektik maddeler orta lamel kısmında yaygın olup, ayrıca birincil ve ikincil hücre duvarları bu tip polisakkaritleri içermektedir.

Pektik karbonhidratlar, galakturonik asit ünitelerinin birbirlerine uzun bir zincir halinde bağlanmasından oluşur. Böylelikle poligalakturonik asitler oluşur.

Dört tip pektik madde tanımlanabilir:

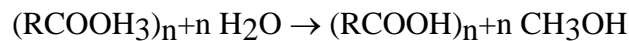
- Hücre duvarının suda çözünmeyen bir bileşeni olan **protopektin** **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**,
- Bir çok metil-ester bağlarını içeren ve galakturonik asitin çözünür bir polimeri olan **pektin** **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**,
- Bir kaç metil-ester grubunu içeren ve kolloidal **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** pektik maddeler olan **pektinik asit** **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**,
- Suda çözünen galakturonik asit polimerleri olan **pektik asitler**.

Bakteri, mantar **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ve aktinomisetler pektik maddeleri hidrolize etme yeteneğinde olup, bu polisakkaritleri karbon ve enerji kaynağı olarak kullanırlar. Kültür ortamlarında pektik maddeler hızlı bir şekilde mikroorganizmalar tarafından ayrıştırılır. Topraklardaki pektolitik organizmalar oldukça geniş bir yer kaplar ve genel olarak 10^5 - 10^6 organizma g^{-1} toprak düzeyinde bulunurlar. Pektik maddeleri kullanan mikroorganizmalar daha ziyade kök bölgesinde yaygındırlar. Bakteriler arasında *Arthrobacter*, *Bacillus*, *Clostridium*, *Micrococcus* ve *Pseudomonas* türleri sayılabilir. Mantarlardan *Streptomyces*, *Micromonospora*, *Actinoplanes*, *Microbispora* ve aktinomisetlerden *Streptosporangium* tanımlanabilir.

Pektik maddelerin çözünmesini sağlayan enzimler üç temel gruba ayrılmaktadır, bunlar:

- Pektinesteraz **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**,
- Polimer molekülünün hidrolitik yarılmamasını etkileyen enzimler
- trans-eliminatif molekül bölünmesi yapan enzimler

Pektinesteraz **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** enzimleri molekülde küçük bir değişim oluşturarak, metil esterlerden, metil gruplarının ayırımında işlev görürler. Bunun sonucunda **pektin** **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** veya **pektinik asitleri** pektik asite çevirirler.



Bu reaksiyon polimeri parçalamamakla birlikte, ayrışma basamağında etkili olacak enzimlerce etkilenebilirliğini arttırmaktadır.

Hidrolitik molekül parçalanmasını etkileyen enzimler iki tiptir.

- Şayet **pektin** **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**, **pektin asitten** daha hızlı etkileniyorsa **katalizör** **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** *polimetil galakturonaz* **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** olarak tanımlanır.
- Şayet **pektik asit** **pektinden** daha hızlı hidroliz **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** oluyorsa, **enzim** **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** poligalakturonaz adını alır. Olay basit bir depolimerizasyon olup, pektik asitin galakturonik asite çevrimi ile son bulur.

Çizelge 10.9. Pektik enzimleri üreten bazı mikrobiyal gruplar

Enzim	Mantar	Bakteriler
-------	--------	------------

Poligalakturonaz^a	<i>Aspergillus</i>	<i>Penicillium</i> ! Yer işareti tanımlanmamış.	<i>Bacillus</i>
	<i>Fusarium</i> <i>Monilia</i>	<i>Rhizoctonia</i> <i>Rhizopus</i>	<i>Erwinia</i> <i>Pseudomonas</i> <i>Xanthomonas</i> <i>Arthrobacter</i>
Pektat liyaz^a	<i>Fusarium</i> <i>Geotrichum</i> <i>Rhizoctonia</i>		<i>Bacillus</i> <i>Clostridium</i> <i>Corynebacterium</i> <i>Flavobacterium</i> <i>Pseudomonas</i>
Polimetilgalakturonaz^b	<i>Aspergillus</i> <i>Botrytis</i> <i>Aspergillus</i>	<i>Fusarium</i> <i>Rhizoctonia</i> <i>Penicillium</i> ! Yer işareti tanımlanmamış.	<i>Arhrobacter</i>
Pektin liyaz^b	<i>Fusarium</i>	<i>Rhizoctonia</i>	<i>Clostridium</i> <i>Corynebacterium</i> <i>Flavobacterium</i> <i>Micrococcus</i> <i>Xantohmonas</i>
Pektinesteraz ! Yer işareti tanımlanmamış.	<i>Alternaria</i> <i>Fusarium</i>		<i>Clostridium</i> <i>Pseudomonas</i> <i>Xanthomonas</i>

a. endo veya ekso enzim Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

b. endo enzim Hata! Yer işareti tanımlanmamış. Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

Trans-eliminatif bölünmeye etken olan katalizörler de depolimerizasyon oluştururlar ve galakturonik asitin modifiye olmuş bir şekli ortaya çıkar. Bu enzimler de iki çeşittir.

- Şayet pektin Hata! Yer işareti tanımlanmamış., pektik asitten daha hızlı etkileniyorsa katalizör Hata! Yer işareti tanımlanmamış. pektin liyaz olarak tanımlanır.
- Pektik asitin etkilenme hızı pektinden fazla ise enzim Hata! Yer işareti tanımlanmamış. pektat liyaz şeklinde adlandırılır. Pektik enzimleri üreten bazı mikrobiyal gruplar, Çizelge 10.9'da görülmektedir.

10.6.3. İnülin Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

İnülin Hata! Yer işareti tanımlanmamış. früktoz ünitelerinden oluşmuş bir polisakkarittir (fruktozan). Molekül 25-28 fruktoz Hata! Yer işareti tanımlanmamış. ünitesinin karbonhidrat zincir bağlantısı (2-1) ile bağlanmasından oluşmuştur. Bu madde bir çok bitkide karbonhidrat depo maddesi olarak bulunur.

Mikroorganizmaların çoğu inülini kullanabilir. Bakterilerden *Pseudomonas*, *Flavobacterium*, *Micrococcus*, *Cytophaga*, *Arthrobacter* ve *Clostridium*'dur. Birçok *streptomycet* ve heterojen mantar **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** grupları fruktoz **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** polisakkaritleri gelişmelerinde C kaynağı olarak kullanırlar. İnüla **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** enzimleri inülini küçük früktoz ünitelerine ayırır.

10.6.4. Kitin **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**

Kitin **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** arthropod iskeletleri ile mantar **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** hücre duvarlarının ve bazı algler ile nematod **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** yumurtalarının en önemli bileşenidir. Selüloz gibi uzun molekül zincirlerinden oluşmuştur.

Bu bileşiğin temel üniteleri amino şekerlerdir. Bu polisakkarit **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** organizmalara gereksindikleri mekanik destek gücünü sağlar. Suda çözünmeyen bir madde olup, organik çözücüler, konsantre alkaliler veya seyreltik mineral asitlere de dayanıklıdır. Yalnızca konsantre mineral asitlerle veya enzimatik olarak parçalanabilir. Strüktürel olarak kitin **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** N-asetil glikoz **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** amin ünitelerinden oluşmuş uzun zincirler meydana getirir. Saf kitin % 6.9 düzeyinde azot içerir ve $(C_6H_9O_4NHCOCH_3)_n$ ampirik formülü ile gösterilebilir. Bu bileşik selüloza oldukça benzerlik gösterir, yalnızca selülozdaki herbir glikozun hidroksil grubu bir asetilamino $(-NHCOCH_3)$ ünitesi ile yer değiştirmiştir.

Kitinin ayrışma ürünleri glikoz **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ve amonyak **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** olup, bunların her ikisi de mikroorganizmalar tarafından geniş ölçüde kullanılan bileşiklerdir. Mantar, aktinomiset **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ve bakterilerin hepsi kitini etkileme gücündedir. En yaygın formlar *Mortierella*, *Streptomyces*, *Pseudomonas* ve *Bacillus*'tur.

Tarım topraklarında aktinomisetler, hakim durumdaki kitin **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ayrıştırıcılarıdır. Su baskını altındaki topraklarda bakteriler (özellikle tropik **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** bölgelerde) ve ılıman bakir çevrelerde mantarlar başat özellik gösterirler.

Kitin **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**, yalnızca mikrobiyolojik yararı açısından değil, mikrobiyal biyosentezlerde sürekliliği nedeni ile toprak C döngüsünde önemli bir yere sahiptir. Toprak kitini, yaşamlarını kısmen veya tümü ile toprak altında geçiren böceklerden kökenlenir.

Ancak bu olguya, gelişme sırasında mantarlar ve muhtelif diğer bazı organizmalar da katılır. Topraklara herhangi bir ilave sonucu kitinHata! Yer işareti tanımlanmamış. yokluğunda bile, komünitenin biyosentezHata! Yer işareti tanımlanmamış. aktivitesi sonucu aminopolisakkaritin oluştuğu gözlenmektedir. KitinHata! Yer işareti tanımlanmamış. hem hayvanlar hem de bitkiler topluluğunun çeşitli üyeleri tarafından üretilmektedir. Filamentli mantarların çoğunun hücre duvarları önemli düzeylerde bu polisakkariti kapsamaktadır. Bir çok bazidiomisetler, bazı mayalar ve muhtemelen bazı protozoaHata! Yer işareti tanımlanmamış. ve alglerin, hücre yapısının bir kısmı kitin içermesine karşın bakteriHata! Yer işareti tanımlanmamış. ve aktinomisetlerin hücre duvarlarında bulunmaz.

Toprak mikroorganizmaları ile yapılan laboratuvar deneylerinde oldukça stabilHata! Yer işareti tanımlanmamış. olan bu maddenin kısa sürelerde ayrışabildiği görülmüştür (Şekil 10.18).

Şekil 10.18. KitinHata! Yer işareti tanımlanmamış. ve selülozHata! Yer işareti tanımlanmamış. ayrışmasının CO₂ oluşumunun saptanması ile ölçülmesi

Saf kitinHata! Yer işareti tanımlanmamış. dar C/NHata! Yer işareti tanımlanmamış. oranına sahip olup N sağlanması gereksinimini aşmaktadır. Bu nedenle organizmaların aktif olduğu sürede inorganik azotun birikmesi söz konusudur. Havalı koşullarda iki aydan kısa bir sürede kitinin % 30 ile 60 düzeyinde mineralize olduğu saptanmıştır. Ancak kitin ayrışması, proteinHata! Yer işareti tanımlanmamış. veya nükleik asitlerin ayrışmasından daha yavaştır. İşlenen topraklar çok sayıda kitin ayrıştıran organizma içermektedir. Polisakkarit ayrıştıran mikroorganizma sayısı 10^6 g⁻¹ toprak düzeyindedir. Toprağın toplam mikroflorası içinde aktinomisetlerin görece az oranda bulunmasına karşın, kitinoklastik organizmalar arasında aktinomisetlerin % 90-99 düzeyinde olduğu görülmektedir. KitinHata! Yer işareti tanımlanmamış. ayrıştırıcı fraksiyonun yalnızca bazı topraklarda bakteriler ve % 1 den az olmak üzere mantarlardan oluştuğu gözlenmektedir. Kitin ayrıştıran komünitenin büyük kısmını *Streptomyces* ve *Nocardia* oluşturmaktadır. Şekil 10.19'da kitin ayrışmasının izlediği yol gösterilmiştir.

Şekil 10.19. Kitinin toprakta ayrışması

10.6.5. Lipidler

Bir çok bitki ve hayvan hücreleri katı yağların ve mumların dahil olduğu değişik lipidleri üretirler. Yağlar yağ asitleri ile gliserinin oluşturduğu karmaşık esterlerdir. Mumlar ise yağ asitlerinin yüksek monohidrik alkoller ile oluşturdukları esterlerdir. Bu bileşikler lipaz **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** (esteraz **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**) enzimi ile parçalanır. Sonuçta kendilerini oluşturan alkol **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** asitlere ayrılırlar. Örneğin tribütrin ayrışarak, bütirik asit ve gliserin oluşturur. Özellikle bakteriler yağ ve mumları etkilemektedir. Ancak toprakta bu ayrışmanın detayları tam olarak bilinmemektedir. Bitki yüzeylerinde bulunan yağların (kütin **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**) ayrışmasına ilişkin bazı bilgiler bulunmaktadır.

Kütinin kimyasal yapısı tam bilinmemekle birlikte, 16 veya 18 yağ asidinin oksijen köprüleri ve ester bağları ile oluşturduğu bir molekül olduğu varsayılmaktadır. Ayrışmada kütin **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** esteraz **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ve karboksi kütin peroksidaz **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** olarak tanımlanan iki enzim **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** görev yapmaktadır. Kütin toprağa ulaşmadan önce yaprak yüzeyi (fillosfer **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**) organizmaları tarafından kısmen ayrıştırılmaktadır. Mayalar ve *Azotobacter* kütikülayı ayrıştırmakta ve böylece yaprakta besin maddesi sızması artmaktadır. Mayalardan *Rhodotorula* ve mantarlardan *Penicillium* **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** *spinulosum*, kütini ayrıştıran en yaygın toprak organizmalarıdır.

10.7. Hidrokarbonların Ayrışması ve Dönüşümleri

Organik karbonun toprak mikroorganizmaları tarafından sayısız denecek düzeyde çok reaksiyona katıldığı işlevler sonucu ayrıştırılması sırasında bir grup dönüşüm reaksiyonları ile toprağa katılmış olan veya toprak içinde sentezlenmiş olan hidrokarbonlar da ayrışmaya uğrar.

Toprakta çok sayıda hidrokarbon ve türevleri sentezlenmekte veya ayrışmaya uğramaktadır. Bu nedenle genel karbon döngüsü içinde önemli bir yer kapsamaktadırlar.

Topraklara katılan hidrokarbonlar içinde çeşitli zararlıların savaşımları için geliştirilen çeşitli yapay kimyasal maddeler bulunmakta ve bu maddelerin topraktaki etkenlik süreleri içinde ayrışmaları, onların zararlıya karşı göstereceği etki düzeyini değiştirebilmektedir. Bundan dolayı, hidrokarbonlar ve ilişkili bileşiklerin mikrobiyolojik etkilenmesinin hem tarımsal ve hem de ekolojik önemi bulunmaktadır.

10.7.1. Toprakta metanHata! Yer işareti tanımlanmamış. oluşumu ve dönüşümleri

Topraklarda oksijen yetmezliği koşullarında, selülozHata! Yer işareti tanımlanmamış., hemiselülozHata! Yer işareti tanımlanmamış., organik asitlerHata! Yer işareti tanımlanmamış., proteinler ve alkoller gibi organik maddelerin ayrışması önemli miktarlarda metanHata! Yer işareti tanımlanmamış. (CH_4) oluşumu ile ilişkilidir.

Su baskını altındaki topraklarda, karbonlu substratların ayrışması sırasında önemli düzeyde metanHata! Yer işareti tanımlanmamış. oluşmaktadır. Hidrojen gazının da anaerobik metabolizmanın bir son ürünü olmasına karşın, metan üreten bakterilerin hidrojeni gelişmelerinde bir enerji kaynağı olarak kullanmalarından dolayı atmosfere geçen kısmı azdır. Anaerob koşullarda tutulan bir toprakta CO_2 ve CH_4 oluşumu Şekil 10.20'de görülmektedir. Metan oluşumunda yalnızca basit organik maddeler ve bitki kalıntılarının ayrışması etken olmayıp; hayvan besisi alanlarında, hayvan gübresinin ayrışması sırasında oksijen azalmasına bağlı olarak metan oluşmaktadır. Çeltik alanları ve bataklık bölgelerden bir yıl içinde oluşan metan miktarı 10 kg' dan fazladır.

Bu en basit hidrokarbonun biyosentezi çevresel koşullardan önemli düzeyde etkilenmektedir. Maksimum oluşum nötral pH yakınlarında olup, pH 6'nın altında aktivite çok azalmaktadır.

Metan oluşturan bakteriler fizyolojik özellikler bakımından bir çok benzerliklere sahip olmakla birlikte, hücre morfolojisi bakımından çok farklıdırlar. Ancak bütün bu şekilsel ayrımlarına karşın metanHata! Yer işareti tanımlanmamış. oluşturan bakteriler tek bir familya altında toplanırlar: *Methanobacteriaceae*Hata! Yer işareti tanımlanmamış.. Bu familya sitolojik farklılıklara göre şu gruplara ayrılır:

- i. Çubuk şekilli bakteriler: *Methanobacterium*
- ii. Küresel hücreler a: Sarsina: *Methanosarcina*
b: Sarsina olmayan gruplar: *Methanococcus*

Spiral şekilli metanHata! Yer işareti tanımlanmamış. oluşturan bakteriler (*Methanospirillum*) atık sulardan izole edilmesine karşın, bu tür organizmalara henüz topraklarda rastlanmamıştır.

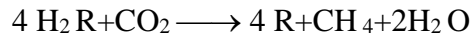
Şekil 10.20. Havasız koşulda toprakta CO₂ ve CH₄ oluşumu

Metan üreten anaerob organizmalar, heterotrofların pek çoğu için yararlı olan konvensiyonel **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** karbonhidratlar ve amino asitleri kullanamazlar. Glikoz ve diğer şekerler de saf kültürlerde fermente olmaz. Aynı şekilde polisakkaritler etkilenmeye karşı dirençlidir. Yalnızca formik, asetik **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**, propiyonik, n-bütirik, n-valerik asitler ile metanol, etanol, isopropanol, n-isobütanol ve n-pentanol gibi kısa zincirli yağ asitleri ve basit alkoller türündeki organik substratlar bu bakteriler tarafından metabolize edilir. Doğal koşullar altında ise iki veya daha fazla mikrobiyal grubun birlikte çalışması ile şekerler, proteinler, selüloz **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ve hemiselülozlar metana çevrilebilir. Bu reaksiyonlarda diğer organizmaların ana substratlardan türetmiş olduğu organik asit ve alkoller metan **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** bakterileri tarafından fermente edilir.

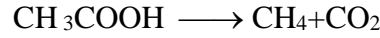
Su etkisi altındaki topraklarda, oksijenin geriye kalan aeroblar tarafından tüketilmesinden sonra, basit yapılı organik asitler **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** birikir. Asetik asit, n-bütirik asit, basit yapılı organik asitler birikir. Asetik asit, n-bütirik asit, formik ve propiyonik asitler CH₄ oluşumuna bağlı olarak artış gösterir. Şayet ortamdaki metan **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** oluşturucular çok aktif değilse, organik asit birikimi daha fazla olur. Oksijensiz ortamlardaki metan oluşumu aşağıdaki reaksiyonlar ile karakterize edilebilir.



Bir seri karbonlu bileşikler için fermentasyon **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** sırasındaki CO₂ şu genelleştirilmiş eşitlik ile ifade edilebilir:



Daha az sayıda ki bazı substratlar ikinci bir mekanizma ile fermentasyona uğrar. Örneğin *Methanosarcina* türleri metanol ve asetat bileşiklerini ayrıştırarak metan **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** üretirler.



Toprakta oluşan ikinci uçucu nitelikli basit hidrokarbon etilen ($\text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2$) dir. Bazı mantar **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** türlerinin kültür ortamında bu gazı ürettikleri bilinmektedir. Örneğin *Agaricus*, *Alternaria*, *Aspergillus*, *Fusarium*, *Mucor* **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**, *Penicillium* gibi mantarlar yanında *Candida*, *Trichosporon* türü mayalar ve *Pseudomonas* türü spor **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** oluşturan bakteriler ile aktinomisetler sayılabilir. Toprakta etilen oluşumuna özel bir ilgi bulunmaktadır. Bunun nedeni etilenin yatay kök gelişimi ve tohum çimlenmesinin artmasına etki etmesidir.

Topraklara organik madde ilavesi ve nem fazlalığı etilen oluşumunu uygun kılmaktadır. Doğada bu hidrokarbonun biyosentezi için gerekli olan etkenler tam olarak bilinmemektedir.

10.7.2. Aromatik bileşiklerin ayrışması

Aromatik bileşikler **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** toprağa ulaşan organik substratlar arasında çok fazla olmamakla birlikte, mikroorganizmaların etki yaptığı önemli madde grubunu oluştururlar. Lignin ayrışması sonucu aromatik **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** yapı bloklarından oluşan ve humus **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** bileşenlerini meydana getiren çeşitli ayrışma ürünleri yanında bitki dokuları tek benzen halkasından oluşmuş hidrokarbonlardan flavonoidler, terpenler ve tanen **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** gibi çok daha karmaşık yapıli bileşiklere kadar bir seri aromatik bileşikler içerirler. Mantar ve aktinomisetler de aromatik ünitelerden oluşan ve melanin **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** olarak tanımlanan bir polimer **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** üretirler. Proteinlerin yapısındaki bazı amino asitler ile hastalık ve zararlı kontrolünde kullanılan yapay kimyasallar da aromatik hidrokarbonları içerirler. Bu maddelerin bir çoğunun zehirli olması nedeniyle toprakta ayrışmaları, bitki gelişimi için uygun olmayan koşulların ortaya çıkmasını önlemek bakımından önemlidir.

Aromatik bileşikler **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**, humus **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**, bitki dokuları, mikrobiyal hücreler ve yapay kimyasal maddelerin ayrışmasından türerler. Örneğin çeltik saplarının ayrışması ile p-hidroksi benzoik, vanilik, ferulik ve sirinjik asitler açığa çıkmaktadır. Toprakta bu tür maddelerin derişimleri 2 ile 8 $\mu\text{mol g}^{-1}$ düzeyinde olabilir. Ayrıca benzen, toluen, ksilen, etil benzen ve naftalen **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** gibi maddeler de çeşitli topraklarda bulunmaktadır. Laboratuvar koşullarında toprağa basit aromatik **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** bileşikler katıldığında bunların ayrışabildiği gözlenmiştir (Çizelge 10.10).

Toprakta aromatik **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** bileşiklerin biyolojik ayrışma süreci, benzen halkasına bağlı olan grupların sayı ve pozisyonundan etkilenmektedir. Bu gruplar OH, CH₃, COOH, CH₂ OH, NH₂ ve SO₃H gruplarıdır.

Çizelge 10.10. Bazı aromatik **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** bileşiklerin ayrışma düzeyleri

Aromatik asitler	Ayrışma miktarları (%)		
	7 gün	14 gün	28 gün
Benzoik Asit	68	71	74
Kaffeik Asit	38	55	59
Protokateşik Asit	32	62	65
Vanilik Asit	52	61	65

Veratrik Asit	59	65	69
---------------	----	----	----

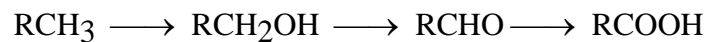
Aromatik hidrokarbonların toprakta ayrışmalarında bakteriler başat grup olup bunlardan *Pseudomonas*, *Mycobacterium*, *Acinetobacter*, *Arthrobacter* ve *Bacillus* grupları sayılabilir. Bazı koşullarda mantar **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ve streptomisetler de aromatik **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** hidrokarbonların ayrışmasına katılırlar.

Topraklara katılan sentetik aromatik **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** hidrokarbonların aromatik halkaya bağlı grupları nitro, kloro veya amino grupları olup bunlar çoğunlukla endüstriyel kirleticilerin veya pestisitlerin tipik gruplarını oluşturur.

Aromatik hidrokarbonların başlangıçtaki ayrışma yolları farklı olsa bile bu reaksiyonlar sonunda, anahtar rolü oynayan bir kaç ara ürün türemektedir. Bu ara ürünlerden en yaygın olanları kateşol (catechol **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**), protokateşik asit (protocatechuic **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**) ve daha az düzeyde olmak üzere gentisik (gentisic **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**) asittir. Bu üç bileşik iki hidroksil içermeleri ile dikkati çekerler.

Aromatik maddelerin ayrışmasındaki ilk basamak benzen halkası üzerindeki değişim (sübstütiye **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**) gruplarının giderimidir. Çeşitli kirleticiler ile doğal aromatiklerin bu ilk ayrışma fazında gün ışığı enerjisi etkili olabilir.

- a. Metil grupları, halka parçalanması kademesinden önce çoğunlukla karboksil gruplarına çevrilir.



- b. Bazen metil grupları halka açılmasından önce giderilemez.
c. Karboksil grupları ise çoğunlukla halka açılmasından önce giderilir, fakat bu her zaman gerçekleşmeyebilir.
d. Metoksil (-OCH₃) grupları bir hidroksil ile yer değiştirerek formaldehid **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** oluşturur. $ROCH_3 + 1/2 O_2 \longrightarrow ROH + HCHO$
e. Uzun alifatik zincirler genellikle kırılarak kısılır ve bir veya iki C atomlu kalıntılı oluştururlar. Kademeli olan bu olay çoğunluk β- oksidasyon **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** yolu ile gerçekleşir.
 $R(CH_2)_9 COOH \longrightarrow RCH_2COOH$

- f. Bir çok herbisitinin yapısında bulunan klor atomları hidrojen veya hidroksil ile yer değiştirir veya halka açılana değin yerinde kalır ve sonra giderilir.
- g. Bazı pestisitler ve endüstriyel kirleticiler için karakteristik olan nitro (-NO₂) grupları ise hidroksiller ile yer değiştirebilir.

Bu dönüşümlerden aktif organizmaların enerji ve karbon sağlamaları için, halkanın kırılması ve parçalanma ürünlerinin enerji üretimi ve biyosentez **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ile ilgili metabolik döngülere girmesi gerekmektedir. Halka açılması her zaman O₂'den gelen oksijene gereksinim gösterir. Bu neden, organizmaların aerob olmasını koştandırmaktadır.

Bir çok mikroorganizma aromatik **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** substratlar sağlandığında kometabolizma reaksiyonları göstermesine karşın, ürünler hiç bir zaman gerekli enerji ve C'u sağlayacak düzeyde gelişmediğinden organizma bundan yararlanamaz. Ancak organizmaların bir çoğu kometabolik reaksiyonlar yolu ile eter bağlarının parçalanmasını ve nitro gruplarının giderimini gerçekleştirebilir. Bu gibi dönüşümlerin pestisit **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** ayrışmasında büyük önemi bulunmaktadır. Böylece kometabolizm **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** yolu ile bilinmeyen toksik **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** moleküllerin ortaya çıkması ve yıllarca toprakta dirençli bir şekilde kalması söz konusudur.

Mikroorganizmalar yalnızca tek halkalı aromatik **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** molekülleri etkilemekle kalmaz, naftalen **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**, naftol, antrasen, fenantren gibi iki ve üç halkalı bileşikler de ayrıştırabilirler (Şekil 10.21). Bu kompleks aromatiklerin heterotrofik ayrışması ile salisilik asit, kateşol ve gentisik asit türemektedir. Özellikle *Pseudomonas* ve *Mycobacterium* türleri bu dönüşümlerin oluşmasında etken organizma gruplarıdır. Çizelge 10.11'de süstitüye benzoik asitlerin toprak mikroflorası tarafından ayrıştırılmasında grupların etkenliği gözlenmektedir.

Şekil 10.21 . İki ve üç halkalı bileşiklerin ayrışması
Çizelge 10.11 Sübstitüye benzoik asitlerin toprak mikroflorası tarafından
ayrıştırılmasında grupların etkenliği

Sübstitüye gruplar ve konumları	Halka parçalanması için geçen gün sayısı		
	orta	meta	para
- COOH	2	8	2
- OH	2	2	1
- NH ₂	2	64	8
- OCH ₃	4	16	2
- SO ₃ H	32	32	32
- NO ₂	8	32	4

Bu grupları içeren pestisit **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.** moleküllerinin ayrışması, grup sayılarının artması ve benzen halkasındaki konumlarına göre direnç kazanmaktadır. Örneğin diaminobenzen, monoaminobenzen'den daha dirençli olduğu gibi, orto ve para klorofenoller meta-konumlu bileşiklerden daha dirençsiz olmaktadır. Bileşiklerdeki hidroksil ve karboksil grupları duyarlılığı arttırırken, amino, metoksi, sülfonat ve nitro gruplarının hepsi ayrışmaya karşı direnci arttırmaktadır.