

Toprak Faunası: Sınıflandırılması ve Besin Ağındaki Yeri

Meriç Çakır^{1*}, Ender Makineci¹

¹İ.Ü.Orman Fakültesi, Orman Mühendisliği Bölümü, Toprak İlimi ve Ekoloji Anabilim Dalı
34473 Bahçeköy/İstanbul

*Tel: +90 212 226 11 00-25295, E-posta: cakirm@istanbul.edu.tr

Kısa Özet

Toprak ekolojisi; toprak içerisindeki primer üretim, toprak flora ve faunası, ölü örtü ayrışması, besin döngüsü, toprak besin ağı, toprak biyoçeşitliliği ve bunların toprak süreçleriyle arasındaki ilişkileri araştırmaktadır. Toprak içerisinde yaşayan canlılar bu süreçlerde hayati rol oynarlar, ancak bu canlıların tek başlarına etkilerinin hesaplanması çok zordur. Bu süreçleri çalışan toprak ekologları, canlıları birlik ve fonksiyonel grup olarak iki basit birime ayırmaktadır. Toprak canlılarının oluşturduğu birlikler birimlere bölünür. Bu birimler beslenme kaynakları, beslenme şekilleri, üreme oranları, avcılara karşı savunma yöntemleri veya toprak profilindeki dağılımları gibi ekosistem süreçlerindeki rollerine göre fonksiyonel gruplara ayrılırlar. Fonksiyonel gruplar içerisindeki komüniteler rekabet ve avlanma gibi ilişkiler ile birbirlerine bağlıdır. Toprak besin ağı çalışmaları birbirine bağlı olan bu fonksiyonel gruplar arasındaki ilişkileri ortaya koymaya çalışmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Toprak faunası, ayrıştırıcılar, kolembola, mikroorganizma, ekosistem mühendisleri, toprak besin ağı

Soil Fauna: Classification and Status in Soil Food Web

Abstract

Soil ecology; deals with primary production in soil, soil fauna and flora, litter decomposition, nutrient cycle, soil food web, soil biodiversity, and interrelations with soil processes. Organisms living in soil have vital importance on these processes, however, estimation of the impact of each organism is too difficult. Soil ecologists who are specially working on these processes separate the organisms in two simple units as “guild” and “functional groups” according to their roles on ecosystem processes such as food resource, dietary specializations, reproductive rates and defense strategies against predators or distribution in soil profile. Communities within functional groups connected each other's with the relations such as competition and hunting. Soil food web studies try to figure out the relations among these functional groups connected with each other's.

Keywords: Soil fauna, decomposers, collembola, microorganism, ecosystem engineer, soil food web

1. Giriş

Karasal habitatlarda en fazla bulunan hayvanlar, ayrıştırıcılar içerisinde yer alan omurgasızlardır. Buna rağmen toprak, gezegenimi-

zin halen en az araştırılan ve en çok bilinmeyen içeren habitatıdır (Wolters, 2001; Coleman ve ark., 2004). Toprak ve ölü örtü eklembacaklıları orman ekosistemlerinin önemli bileşenlerindedir ve ayrışma sürecinde çok önemli görevleri vardır.

Received: 26.01.2011; accepted: 03.03.2011

Toprak ve ölüörtüde yaşayan canlılar toprağın gözenek yapısını, havalanmasını, infiltrasyonunu ve toprak içerisindeki organik maddenin dağılımı gibi birçok önemli süreçte etkilidirler (Bird ve ark., 2004). İşte bu karmaşık yapı içerisindeki birincil üretim (kök bölgesi), toprak flora ve faunası, ölüörtü ayrışması, besin döngüsü, toprak besin ağı, toprak biyoçeşitliliği ve toprak süreçleri arasındaki ilişkileri araştıran bilim dalı Toprak Ekolojisi'dir.

Toprak ekosistemi diğer ekosistem yapılarından önemli derecede farklıdır. Diğer ekosistemlerde enerji girişinin büyük bir kısmı güneş enerjisi ile sağlanır ve birincil üreticiler olan bitkiler bu enerji ile fotosentez yaparak organik madde üretirler. Toprak ekosisteminde ise enerji girişi bitkisel tabanlı organik madde ile gerçekleşir. Karasal ve sulak ekosistemlerde birincil üreticilerin yaptığı işi toprak ekosisteminde ayrıştırıcı canlılar gerçekleştirir.

Ayrışma biyosfer düzeyinde iki nedenden dolayı çok önemlidir. Birincisi, ayrışma sırasında ürün olarak karbon dioksit, metan ve azotlu gazlar çıkmaktadır. Bilindiği üzere bu gazlar sera gazı olarak adlandırılır ve küresel iklim değişikliği üzerinde önemli etkileri vardır (Berg ve McLaugherty, 2008). İkincisi, karasal ekosistemlerdeki en önemli karbon deposu topraktır (Chapin ve ark., 2002). Ayrışma ürünü olan karbon toprak içerisinde humus ve organik bileşikler halinde tutulur ve atmosfere salınmaz (Schlesinger ve Andrews, 2000). Ekosistem seviyesinde ise ayrışma farklı nedenlerden dolayı önemlidir. Besin döngüsü, organik maddenin toprağa karışması ile başlar. Ayrışan organik madde toprağın katyon değişim kapasitesini artırır ve besin elementlerinin tutulmasında önemli etkisi vardır. Ayrıca toprak içerisindeki komünitelerin çeşitliliğini ve miktarını etkiler. Toprak besin ağının tamamı organik atıkların ayrışmasına dayanmaktadır. Ayrışan materyal toprağa karışarak birincil üretime katkı sağlar bu da göstermektedir ki bütün ekosistemdeki birincil üretimin devamlılığı ayrışma ile devam edebilmektedir.

Toprakaltı canlı toplulukları ve ekosistem süreçlerine etkileri göreceli olarak ekolojinin yeni bir alanıdır (Bardgett ve ark., 2005). Toprak organizmalarının toprak verimliliğine olan etkileri bilinmesine rağmen (Darwin, 1881) bitki komünitelerine ve ekosistem süreçlerine olan fonksiyonel önemleri 1990'larda çalışılmaya başlanmıştır (Hooper ve ark., 2005). Topraküstü ve toprakaltı ekosistemleri, ölüörtü ayrışması ile birbirlerine bağlanmaktadır. Ölüörtü ayrışması; iklim, ölüörtü kalitesi, toprak organizmaları ve toprağın fiziksel ve kimyasal özellikleri tarafından

yönetilen önemli biyolojik bir süreçtir. En yaygın toprak hayvanları olan toprak eklembecaklıları ölüörtü ayrışmasını, besin döngüsünü, toprak sıcaklığını, bitki ve toprak faunasının bileşimi ile aktivitelerini artırarak orman ekosistemindeki birincil üretimi etkilemektedir (Swift ve ark., 1979; Coleman ve ark., 2004; Wang ve ark., 2009).

Toprak içerisindeki besin ağına, değişik boyutlarda, çeşitlilikte ve farklı görevleri olan canlılar yaşamaktadır. Bu canlıların ekosistem içerisindeki birincil görevleri toprakaltı ve üstündeki bitkisel tabanlı besin ağı içerisindeki organik madde döngüsüne katkıda bulunmaktadır (Bardgett, 2005). Toprak içerisindeki tüm canlılar, ayrışma ve besin mineralizasyonu süreçlerinde yer alır. Ayrıştırma işlemi ayrıştırıcı canlıların vücut boyutları ile yakından ilişkilidir (Jones ve ark., 1994; Cole ve ark., 2006).

Bu çalışmanın amacı toprak ekosistemindeki canlıların, ekosistem süreçlerine olan etkilerinin belirlenmesidir. Bunun için, toprak içerisinde farklı nichelerde bulunan komünitelerin belirlenmesinde hangi sınıflandırmaların kullanılacağına bilinmesi önemlidir. Karmaşık besin ağı içerisinde yer alan canlıların birbirleri ile ilişkilerinin anlaşılması, besin ağı ve içerisinde bulunan bileşenlerin (Rizosfer, ölü örtü parçalayıcıları, ekosistem mühendisleri) tanımlanması ile mümkündür.

2. Toprak Canlılarının Sınıflandırılması

Toprak canlıları araştırma konusuna bağlı olarak çalışma kolaylığı sağlaması için farklı sınıflandırmalar altında toplanmışlardır. Bu sınıflandırmalardan en çok kullanılan 1) Fonksiyonel, 2) Vücut boyutlarına göre ve 3) Toprakta bulunuşlarına göre yapılan sınıflandırmalar aşağıda açıklanmaya çalışılmıştır.

2.1. Fonksiyonel sınıflandırılma

Toprak canlılarının sınıflandırılması için türlerin toplanma kriterlerine bağlı olarak farklı terimler önerilmiştir. Root (1967) "aynı sınıf içerisinde, çevresel kaynakları benzer yollar ile kullanan" tür grupları için birlik terimini önermiştir. Daha sonra Moore ve ark. (1988) "üreme oranları, avcılara karşı savunma biçimleri ve toprak profilindeki dağılımları" benzer olan türler için fonksiyonel grup terimini önermiştir.

Grup içerisindeki türlerin örneklenmesinde kullanılan kriterler 1) yaşama taktikleri, 2) mikrohabitatları, 3) temel besinleri, 4) beslenme biçimleri ve 5) ekofizyolojileri olarak özetlenebilir

(Ruiter ve Moore, 2004). Teorik olarak grup içerisindeki farklı türlerin toplanması benzer olabilmesine karşın uygulamada yukarıdaki beş kriter buna izin vermez. Örneğin kök ile beslenen böcekler ve nematodlar farklı yöntemler ile toplanır. Teorik olarak toplama bakımından birlik ve fonksiyonel grup terimleri aynı anlamda gözükmese de rağmen birlik terimi fonksiyonel grup'a göre türlerin daha geniş sınıflandırmasında kullanılır (Brussaard, 1998).

En iyi bilinen toprak organizmalarına ait üç birlik şu şekilde özetlenebilir (Jones ve ark., 1994; Brussaard, 1998):

Bitkiler ile birlikte yaşayan ve yararlı veya zararlı etkileri olan canlılardır. Bu canlılar, mikoriza ve azot (N) bağlayıcı bakteriler gibi köklerde simbiyotik yaşayan veya kök ile beslenen canlılar olup kök biyotası olarak adlandırılırlar.

Mikro-mezofauna, mikroorganizma ve mikrobiyal tüketicilerin sayılarını ve aktivitelerini düzenlerler. Bu gruba ayrıştırıcılar denir. Ayrıca ayrıştırıcı olan mezo ve makrofauna ölü örtünün parçalanarak mineral toprağa karışmasını sağlar.

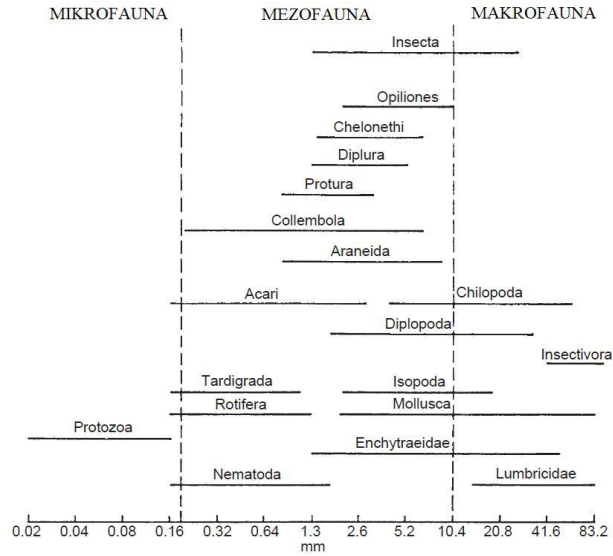
Mezo-makrofauna aktiviteleri ile diğer toprak canlıları üzerinde etkili olan mikrohabitatlar

oluştururlar. Bu grubu genel olarak karınca, termitler ve solucanlar oluşturur ve bunlara ekosistem mühendisleri denir.

2.2. Vücut boyutlarına göre sınıflandırma

Toprak ekolojisi üzerine araştırma yapan birçok araştırmacı toprak canlılarının vücut, şekil ve boyutlarındaki şaşırtıcı değişkenliği fark etmiş ve buna göre toprak faunasını mikrofauna, mezofauna ve makrofauna olarak üç gruba ayırmıştır (Coleman ve ark., 2004; Bardgett, 2005; Lavelle ve ark., 2006) (Şekil 1). Bu sınıflandırma 1-2 mikrometrelik (μ m) tek hücreliler (Protozoa) ile Avustralya solucanı (Lumbricidae) gibi birkaç metrelik dev omurgasızlar arasında değişmektedir.

Vücut boyutuna bağlı olan sınıflandırmadaki derecelendirme şüphesiz önemlidir. Mezofaunanın en küçük bireyleri mikrofauna ile en büyük bireyleri ise makrofauna ile benzer özellikler göstermektedir (Şekil 1). Bununla birlikte sınıflandırmanın böyle olması önemli kolaylık sağlamaktadır (Coleman ve ark., 2004).



Şekil 1. Toprak hayvanlarının vücut boyuna göre yapılan genel sınıflandırma (Coleman ve ark., 2004'ten).
Figure 1. A generalized classification of soil fauna by body lengths (from Coleman et al., 2004).

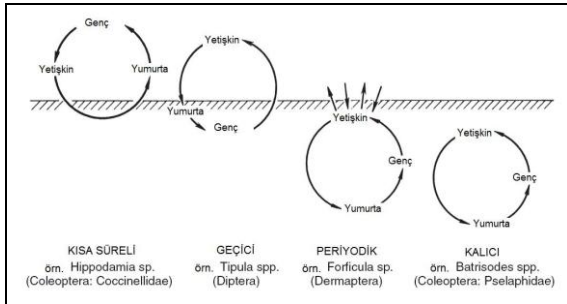
Toprak omurgasızları çok büyük yapısal çeşitlilik gösterirler. En son yapılan hesaplamalara göre toprak hayvanları, yaşayan tüm organizmaların %23'ünü oluşturmaktadır. Canlıların vücut genişliği yaşadıkları mikrohabitat ile ilişkilidir ve boyutsal olarak üç gruba ayrılır. En küçük olanlar Nematodlar

ve Protozoalar (Protist) 200 μ dan küçük mikrofaunayı oluşturur; toprak etrafında ve boşluklarında bulunan su filmlerinde yaşarlar. Mikroeklembacıklılar ve mezofaunanın (0.2-2 mm) bir çok grubu toprak içerisindeki boşluklarda yaşar. En büyük olan Chilopoda, Diplopoda ve Crustacea

sınıfları ölüörtü veya toprak içerisinde yaşar ve yuva yaparak toprağı şekillendirebilirler (Lavelle ve ark., 2006).

2.3. Toprakta bulunuşlarına göre sınıflandırma

Toprak canlıları, toprakta bulunma sürelerine (kısa süreli veya kalıcı) veya farklı yaşam formlarının toprak içerisindeki mikrohabitatlarda bulunmalarına (yumurta, genç, ergin) göre de sınıflandırılabilirler (Şekil 2). Örnek olarak uğur böcekleri (Coccinellidae) uyku dönemlerini toprak içerisinde veya ölüörtü tabakaları arasında geçirirler bu yüzden geçici tür olarak adlandırılır. Benzer olarak bazı larva ve kurtlar (Diptera) toprak içerisinde yaşar, ayrıştırıcı olarak kök ve bitki artıkları ile beslenir, ergin dönemlerini toprak üstünde geçirirler. Diğer yandan bazı akarlar (Acarina) ise sadece üremek için toprak üstüne çıkarlar. Örneklerde görüldüğü gibi toprak canlılarının komünite yapıları ve ekolojileri yıl içerisinde değişiklik göstermektedir bu da toprak içerisinde enerji akışını ve besin zincirini etkilemektedir (Doblas-Miranda ve ark., 2007). Canlıların yer değiştirmesi toprak içerisindeki besin ağı ile topraküstü sistemlerdeki besin ağını birbirine bağlar. Toprak içinde kalıcı olarak yaşayan canlıların bile yaşam döngüleri farklı derinliklerde geçmektedir ki bu durum besin akışı analizinin yapılmasını zorlaştırır (Coleman ve ark., 2004).



Şekil 2. Toprak canlılarının, toprakta bulunuşlarına göre sınıflandırılması, bazı böcek gruplarına göre çizilmiştir (Coleman ve ark., 2004'ten).

Figure 2. Categories of soil animals defined according to degree of presence in soil, as illustrated by some insect groups (from Coleman et al., 2004).

Örneğin mikroeklembacıklılar içinde kolembola (Collembola) türlerinin büyük bir kısmı yaşamlarının tamamını toprak içerisinde geçirirler. Kolembola familyalarının morfolojik yapıları, farklı

toprak katmanlarında yaşamaya uyumlu olduklarını göstermiştir. Toprak üstünde veya yaprak katmanında yaşayan kolembola türlerinin büyük, renkli, uzun antenli ve sıçramak için iyi gelişmiş organları (furcula) varken toprağın derin katmanlarında yaşayanlar küçük, beyaz ve kısa antenlidir (Şekil 3) (Kühnelt, 1961).



Şekil 3. Kolembola (Family: A: Sminthurididae, B: Neelidae, C: Entomobryidae) (Foto: M. Çakır)

Figure 3. Collembola (Family: A: Sminthurididae, B: Neelidae, C: Entomobryidae) (Foto: M. Çakır)

3. Toprak Canlılarının Toprak Besin Ağındaki Yerleri

Birçok araştırmacı dünya üzerindeki canlı çeşitliliğinden etkilenmiş ve biyoçeşitliliğin karmaşık yapısı ile hangi faktörler tarafından kontrol edildiklerini anlamak için tür topluluklarının ekolojilerine yoğunlaşmışlardır (Scheu, 2002). Ekolojinin bu dalı genel olarak biyoçeşitliliğin topraküstü kısmı ile ilgilenmiş (Mittelbach ve ark., 2001), toprakaltı kısmı ile yeterli çalışma yapılmamış ve gereken önem verilmemiştir. Buna rağmen, dünya biyoçeşitliliğinin büyük bir kısmını toprakaltı barındırmaktadır (Bardgett, 2005).

Toprak içi tür toplulukları ile çalışan araştırmacılar toprakaltı canlılarının birbirleri ve toprak besin ağındaki yerleri hakkında araştırma yapmaktadırlar. Toprak bir sistem olarak içerisinde

birçok canlı barındırmaktadır. Topraktaki bu canlılar çeşitli seviyelerdeki besin ağı içerisinde yer alır. Toprak içerisinde çeşitliliği, sayıları ve biyokütleleri ile baskın gruplar olan bakteri ve mantar gibi mikroorganizmalar varken, protozoa (amebae, flagellate, ciliate), nematod (bakterivor, fungivor, omnivor, herbivor ve predatör), akar (bakterivor, fungivor, predatör), kolembola (fungivore and predatör), saksı kurtları (enchyraeidae), solucanlar (lumbricidae) vb. geniş çeşitliliğe sahip mikro ve mezofaunaya ait çok çeşitli canlı grupları bulunmaktadır (Ruiter ve Moore, 2004). Bu canlıların ekosistem içerisinde en önemli fonksiyonları bitkisel tabanlı besin ağındaki organik maddenin dönüşümünü sağlamaktır (Bardgett, 2005). Son çalışmalar toprak besin ağındaki en yaygın canlıların omnivor canlılar olduğu belirtilmiştir ki (Ponsard ve Ardit, 2000; Scheu ve Falca, 2000) bu da toprak besin ağındaki ilişkilerin ne kadar karmaşık olduğunu göstermektedir. Bütün toprak canlıları arasındaki besin ilişkileri, toprak organik maddesinin ayrışması ve besin elementlerinin mineralizasyonu gibi küresel döngüleri yönetmektedir. Bu gibi süreçler, kullanılabilir besin elementlerini belirlerken toprakaltı besin ağındaki ilişkiler topraküstü primer üretimi ve karbon (C) birikimini etkiler (Blomqvist ve ark., 2000; Ruiter ve Moore,

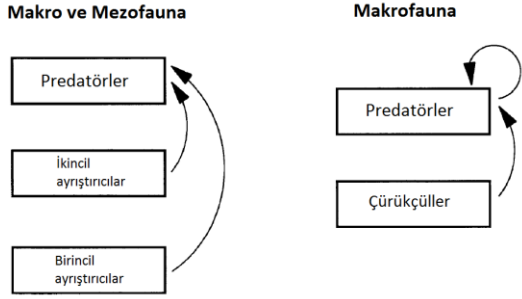
3.1. Trofik ilişkiler ve ekosistem süreçleri

Toprak organik maddesinin ayrışması ve besin elementlerinin mineralizasyonu gibi toprak içerisindeki önemli ekosistem süreçleri, beslenme ve toprak besin ağındaki süreçlerin sonucunda oluşur. Sayıca çok fazla olan mikropların toprak süreçlerine çok önemli katkıları vardır ve sayıları az olmasına rağmen faunal gruplarında süreçlere katkısı önemlidir. Toprak faunasının enerji, organik madde ve besin döngüsüne katkıları sadece popülasyon boyutları ve enerji kullanımlarına değil aynı zamanda birbirleri ile olan etkileşimleri ve ekosistemi etkilemelerine bağlıdır. Mikroeklembacıklılar gibi bazı faunal gruplar beslenme aktiviteleri esnasında organik maddeyi parçalarlar bunun sonucunda mikrobiyal saldırı için organik maddenin

yüzeyini artırırlar (Cole ve Bardgett, 2002; Cole ve ark. 2006; Pieper ve Weigmann, 2008). Ayrışma sürecinde toprak faunasının diğer bir önemli etkisi de mikrobiyal popülasyonun yayılmasını sağlamaktır. Nematodlar ve mikroeklembacıklılar sindirim sistemleriyle veya üzerlerinde bakterileri, mantarları ve protozoları toprak içerisinde taşırlar. Böylelikle faunal gruplar primer ayrıştırıcıları organik maddeye taşıyarak katalizör görevi görürler (Wardle, 2002; Coleman ve ark., 2004). Mikroplar ile beslenen fauna, mikrobiyal canlıların topluluk yapılarını değiştirerek toprak organik maddesinin ayrışmasını etkiler. Predatörfauna ekosistem süreçlerini, bakteri ile beslenen nematod popülasyonunu azaltarak ve bakteri popülasyonlarının artmasına izin vererek dolaylı olarak etkiler.

3.2. Toprak besin ağı

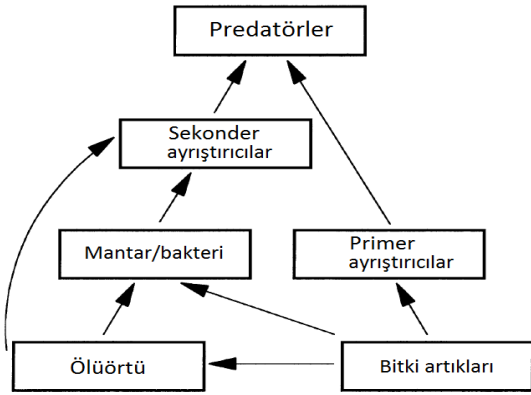
Toprak ekosistemi çalışmalarında geleneksel indirgemeci metotlar etkili olmaktadır. Karmaşık gerçek dünya, mekansal olarak baskın olan toprak hayvanlarının oluşturduğu birliklere göre birimlere bölünmüştür (Brussaard, 1998). Bu birimler beslenme kaynakları, beslenme şekilleri, üreme oranları, avcılara karşı savunma yöntemleri veya toprak profilindeki dağılımları gibi ekosistem süreçlerindeki rollerine göre fonksiyonel gruplara ayrılırlar (Ruiter ve Moore, 2004). Fonksiyonel gruplar içerisindeki komüniteler rekabet ve avlanma gibi ilişkiler ile birbirlerine bağlıdır (Taylor ve ark., 2010). Fonksiyonel birimler içerisindeki bu gibi komüniteler toprak besin ağının analiz edilebilmesini sağlar. Fonksiyonel gruplar içerisindeki organizmaların davranışları, taksonomik birimler içerisindeki organizmaların davranışlarına göre daha çok benzerlik göstermektedir. Bu bakımdan toprak ekolojisi çalışmaları zoolojik çalışmalardan farklıdır. Popülasyon ve komünitelerin dinamikleri karşılıklı besin ilişkisine dayanır. Tür topluluklarının karmaşık düzendeki beslenme ilişkileri, türler veya birlikler arasındaki ilişkiler göz önüne alınarak (av avcı ilişkileri vb.) ikili oklar ile çizilir (Şekil 4). Besin ağlarının çizilmesindeki en önemli amaç toprak canlılarının ayrışma süreçlerine ve besin döngüsüne olan etkilerini anlamaktır (Brussaard, 1998; Scheu, 2002).



Şekil 4. Basit toprak ayrıştırıcılarına ait besin ağı (Scheu ve Falca, 2000; Ponsard ve Arditi, 2000)

Figure 4. Food web of basic soil decomposers (Scheu and Falca, 2000; Ponsard and Arditi, 2000)

Ayrıştırıcı komüniteler; predatörler, primer ve sekonder ayrıştırıcıları içerir. Fakat besin ağının taban ve orta seviyesindeki canlılar trofik olarak bağlantılı değildir. Daha karmaşık trofik ilişkilerde besin ağları bitki artıklarını ve mikroorganizmaları da içerir (Şekil 5).



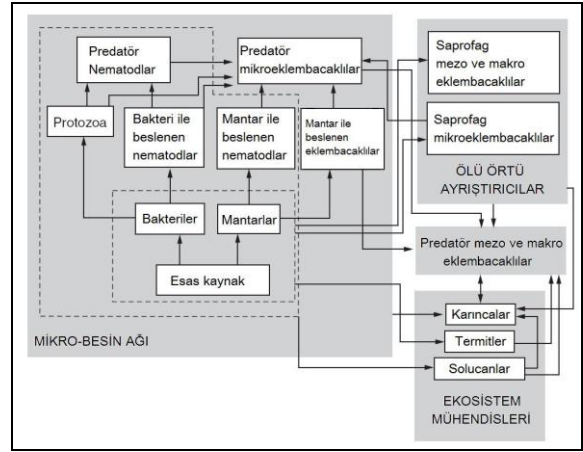
Şekil 5. Toprak besin ağına ait kavramsal model (Scheu, 2002).

Figure 5. Conceptual model of soil food web (Scheu, 2002).

Yukarıdaki (Şekil 5) besin ağı modelinde primer ve sekonder ayrıştırıcılara ait iki enerji kanalı görülmektedir. Primer ayrıştırıcılara ait kanal üç farklı trofik seviyeden oluşmaktadır. Sekonder tüketicilere ait kanal ise daha karmaşıktır ve omnivorları da içermektedir. Burada sekonder ayrıştırıcılar hem mikroorganizmalar ile hem de ölü örtü ile beslenmektedirler. Toprakaltı besin

ağının çok esnek olduğu görülmektedir. (Scheu, 2002).

Daha karmaşık olan toprak besin ağında ise üç farklı seviyedeki katılımcı önerilmiştir. Solucan, termit ve karıncalar gibi “Ekosistem mühendisleri” toprağın fiziksel yapısını değiştirerek besin ve enerji akışını etkilerler. “Ölü örtü ayrıştırıcıları” olan mikroeklembacaklılar ayrışmakta olan ölü örtüyü parçalar ve mikropların faaliyetlerini artırırlar. “Mikrobesin ağı” kök bölgesindeki (rizosfer) mikrobiyal grupları ve mikrofauna ile beslenen predatörleri (nematodlar ve protozoalar) içerir (Şekil 6) (Coleman ve ark., 2004).



Şekil 6. Üç farklı kategoriye ayrılmış toprak besin ağına ait bileşenler; ekosistem mühendisleri, ölü örtü ayrıştırıcıları, mikrobesein ağı (Coleman ve ark., 2004'ten).

Figure 6. Organization of the soil food web into three categories; ecosystem engineers, litter transformers, and micro-food webs (from Coleman *et al.*, 2004).

4. Toprak Besin Ağına Ait Bileşenler

Biyolojik aktivitenin en yoğun olduğu yer topraktır. Fakat bitkilerin ve ölü bitki dokularının toprağa ulaştığı yerlerde biyolojik aktivite artar. Canlı ve ölü köklerin bulunduğu ve ölü organik maddenin depo edildiği kök bölgesi ile bitkilerin toprak üstü kısımlarından dökülen ölü organik maddenin biriktiği katman (ölü örtü), ayrıştırıcıların aktif olarak bulunduğu bir yaşama alanı, bir ekosistemdir ve karasal ekosistemlerde ayrışma işlemini, büyük ölçüde toprak canlılarının

aktiviteleri etkilemektedir (Swift ve ark., 1979; Wolter, 2001; Coleman ve ark., 2004; Cardon ve Whitbeck, 2007).

4.1. Kök bölgesi (Rizosfer)

Kök bölgesindeki canlı ve ölü kökler etrafında en fazla bulunan ve bu bölgedeki organik maddeyi asıl tüketen mikroplardır (bakteri, mantar, aktinomiset ve alg). Kök bölgesi ve kök bölgesi dışında kalan topraklardaki protozoa ve nematod sayıları ölü köklerden canlı köklere doğru sırası ile 1 – 35 ve 3 – 70 (birey) arasında değişmektedir (Brussaard, 1998; Cardon ve Whitbeck, 2007). Toprakta yapılan DNA analizlerinde, bir avuç toprakta 10,000'den fazla prokaryotik canlı (Tablo 1) (Torsvik ve ark., 2002) ve 4×10^6 takson olduğu tahmin edilmektedir (Curtis ve ark., 2002). Toprak içerisinde binlerce mikrobiyal tür olduğu bilinmektedir. Bu canlılar kompleks organik maddenin ayrışmasından ve mineralizasyonundan sorumludurlar. Mikroplar, toprak besin ağının sayıca ve çeşitlilik olarak en fazla olan canlılarıdır. Bakteri ve mantarlar, mikropların sayıca en fazla bulunan iki grubudur. Mantarların birincil rolleri, hücre dışı enzimleri ile organik maddenin ayrışmasını sağlamaktır. Diğer önemli rolleri ise toprak parçacıklarını bağlayarak toprak strüktürüne katkıda bulunmak ve mikroplar ile beslenen toprak faunasına besin sağlamaktır (Ruiter ve Moore, 2004; Bardgett, 2005).

Tablo 1. Farklı habitatlardaki prokaryotların miktar ve çeşitliliği (Torsvik ve ark., 2002'den)

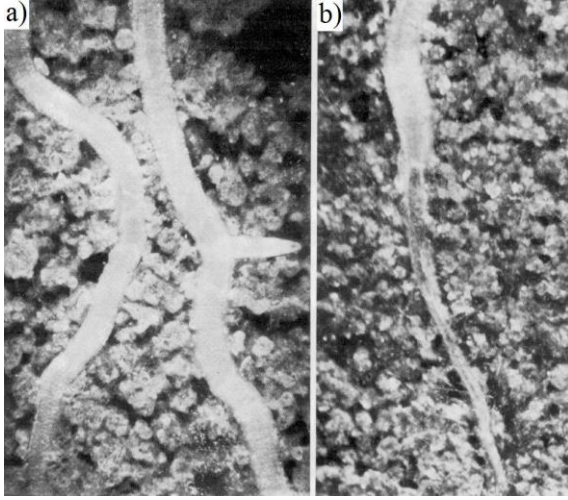
Table 1. Abundance and diversity of prokaryotes in different habitats (from Torsvik et al., 2002)

Habitat	Miktar (m^{-3})	Çeşitlilik
Orman toprağı	4.8×10^9	6000
Mera toprağı	1.8×10^7	3500-8800
Tarım toprağı	2.1×10^{10}	140-350

Mantarlar bakterilerden farklı olarak ökaryotikdirler. Genellikle iplikli lifler üreterek topraktaki mikro habitatlara girerler. Mikoriza gibi

bazı mantarlar bitki kökleri ile mutualistik ilişkiler kurarak bitkiye büyümesi için gerekli olan N ve P sağlarken bitkiden fotosentez ile yaptığı C'u enerji kaynağı olarak alır (Bardgett, 2005; Walling ve Zabinski, 2006; Endlweber ve Scheu, 2006). Bakteriler en zor şartlarda bile yaşayabilen olağanüstü sayılarda ve çeşitlilikte olan canlılardır. Mantarlar gibi heterotrofik bakterilerin toprak içerisindeki genel rolleri hücre dışı enzimleri ile organik bileşikler parçalamaktır. Belirli özellikleri olan bazı bakteriler çok büyük ekolojik öneme sahiptir. Besin ağı içerisindeki bu bakteriler azot döngüsünde (Nitrosomanas ve Nitrobacter) amonyumoksiti nitrata çevirirken, bazı bakteriler de (Rhizobium) baklagillerin köklerinde simbiyotik yaşayarak bitkiye N sağlarken bitkinin verimliliğini ve topluluk yapısını önemli derecede etkilerler.

Toprak mantarları ile fungivor (mantar yiyen) mikroeklembacıklılar arasındaki etkileşim; ağaçların ince köklerinin (<2mm) morfolojileri ve büyümelerine önemli etkiler yapar (Şekil 7) (Kreuzer ve ark., 2004; Hiski ve Takeda, 2008). Son çalışmalar bazı kolembola türlerinin; kök bölgesinde simbiyoz (ortak) olarak yaşayan mantarlar üzerinde uyarıcı ve baskılayıcı etkisi olduğunu göstermektedir (Hopkin, 1997; Kampichler ve ark., 2004). Kaneko ve ark., (1998) yapmış oldukları çalışmada mezofaunanın mikrobiyal solunumu önemli derecede arttırdığını ve fungal biyokütleyi önemli derecede azalttığını belirtmişlerdir. Bazı mikroeklembacıklılar (collembola, akar vb.) ölü organik maddeyi ve özellikle ölüörtünün çürüntü tabakasındaki mikroorganizmaları (Protozoa, Nematoda, Rotatoria, Enchytraeidae vb.) tüketerek mikroorganizma popülasyonunu ve aktivitelerini etkilerler (Faber, 1991; Rusek, 1998; Hattenschwiler ve Bretscher, 2001). Bahsedilen mikroeklembacıklıların sindirim sisteminden geçen ölüörtü ufalanarak mikrobiyal canlıların kullanabileceği yüksek besin maddesi içeren organik madde olarak ortaya çıkar (Pieper ve Weigmann, 2008). Bu işlemler sırasında kök bölgesine doğrudan etkileri olmasa da dolaylı olarak etkilerler.



Şekil 7. Kolembolaların (*Rhizoctonia solani*) enfeksiyonundan koruduğu kök (a), kolembolaların olmadığı alandaki hastalıklı kök (b) (Coleman ve ark., 2004'ten).

Figure 7. Collembolan protection of roots from infection by *Rhizoctonia solani* (a), diseased root from pathogen-infested soil without collembola (b) (Coleman et al., 2004'ten).

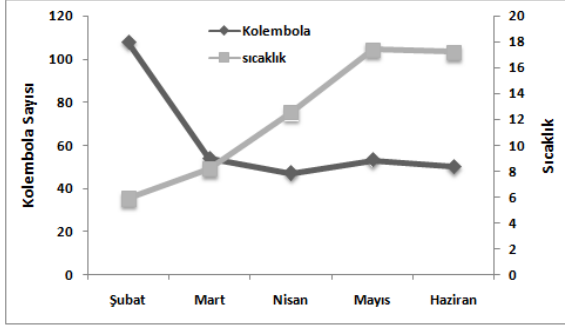
4.2. Ölüörtü parçalayıcıları

Akarlar (Acarina), kolembolalar (Insecta), tespih böcekleri (Isopoda), kırkayaklar (Diplopoda), solucanlar (Oligochaeta) ve birçok böcek larvası toprak üstündeki ölüörtüyü toprak içine karıştıran önemli canlılardır (Lavelle ve Spain, 2001; Coleman ve ark., 2004; Bardgett, 2005). Çeşitli ekosistemlerde yapılan çalışmalar karbon döngüsünün yaklaşık %15'lik kısmının toprak eklembecaklıları tarafından desteklendiğini göstermektedir (Toyota ve ark., 2006). Toprak canlıları karbon döngüsüne, ayrışma sürecinde yapmış oldukları beslenme faaliyetleri ile katkıda bulunurlar.

Toprak yüzeyinde ve katmanları arasında yaşayan canlıların beslenme alışkanlıkları farklı olup, bu durum besin ağındaki yerlerini etkilemektedir. Kırkayak ve tespih böcekleri, yeni

düşen taze yapraklar yerine ayrışmaya başlamış ölüörtüyü tercih ederlerken (Coleman ve ark., 2004) fungivor ve saprofaq kolembola ve akarlar bol miktarda mantar ve bakteri saldırısına uğramış yeni düşen taze yaprakları tercih etmektedir (Berg ve Laskowski, 2006). Ashwini ve Sridhar (2005) *Arthrosphaera magna* Attems (Isopoda)'in düşük fenoller içeren fakat yüksek kalsiyum (Ca) oranına sahip ölüörtünün çürüntü tabakası ile beslendiğini belirtmişlerdir. Çürükçül omurgasızlardan özellikle kırkayaklar, tespih böcekleri ve Diptera larvaları yıllık dökülen ölüörtünün %20-100'ünü (Ashwini ve Sridhar, 2005) mikroeklembecaklılar ise %12 sini ayrıştırmaktadır (Joo ve ark., 2006). Eklembecaklılar ölüörtü ve üzerinde yetişen mantar ve bakteriler ile beslenerek humuslaşma ve mikrobiyal ayrışmayı etkilerler (Brussaard, 1998). Ölüörtü-yiyen ve toprak-yiyen olarak ayrılan toprak solucanları (Uchida ve ark., 2004) ise ölüörtüyü parçalayarak organik maddenin yüzeyini arttırırken, organik madde ile mineral toprağı karıştırarak organomineralleri oluştururlar (Lavelle ve ark., 1997; Curry ve Schmidt, 2007).

Toprak eklembecaklılarının popülasyon yoğunlukları ve hayatta kalmaları sadece besine değil aynı zamanda toprağın fiziksel ve kimyasal özelliklerine de bağlıdır. Tespih böceklerinin toprak nemi, kırkayakların ise toprak kalsiyumu ile olan ilişkileri çalışılmıştır (Dunxiao ve ark., 1999). Sayıca çok fazla olan mikroeklembecaklı grupları (özellikle akarlar ve kollembolalar) çok farklı toprak tiplerinde bulunurlar. Toprak içerisindeki sayıları neme bağlı olarak mevsimsel değişim göstermektedir (Şekil 8) (Wiwatwitaya ve Takeda, 2005; Çakır ve Makineci, 2009). Mikroeklembecaklıların mevsime bağlı olarak sayılarındaki değişim organik karbon ile güçlü, toprak pH'sı ile zayıf bir ilişki içerisinde (Reynolds ve ark., 2007). Araneae, Diplopoda, Staphylinidae ve Formicidae taksonlarının toprak organik maddesinin zengin olduğu ve kumlu balçıklı toprakları tercih ettiği görülmüştür (Dunxiao ve ark., 1999). Alp meralarında yapılan çalışmada toprak özelliklerinin (pH, toprak organik maddesi, C/N oranı, basal solunum) ayrıştırıcı türlerin popülasyon dinamiklerini az miktarda etkilediğini, solucan faaliyetlerinin ise toprak agregat stabilitesini (%10-15) ve ayrışmayı güçlü bir şekilde arttırdığı belirtilmiştir (Seeber ve ark., 2006).



Şekil 8. Kolembola sayısının toprak sıcaklığına bağlı değişimi (Çakır ve Makineci, 2009'dan).

Figure 8. Variation of collembola number depending on soil temperature (from Çakır and Makineci, 2009).

Orman ölü örtüsünde 1 metrekare alan, binlerce farklı türü temsil eden yüz binlerce bireyi içerir. Toprak mikroeklembacaklılarının en yüksek yoğunluğu m^2 'de 300.000 adet olarak yüksek organik madde ve kök yoğunluğu olan otlaklarda bulunmuştur (Coleman ve ark., 2004). Tayland'ın kurak herdem yeşil ormanlarında Kolembola türleri toprak nemine bağlı olarak mevsimsel değişim göstermekte ve m^2 'deki sayıları kurak sezonda 3.129 iken nemli sezonda 8.904 olmaktadır. Akarların kurak sezondaki m^2 'deki sayıları 25.443 iken nemli sezondaki sayıları 26.548 olmaktadır. Sayılarındaki bu değişim yaşam stratejilerinden kaynaklanmaktadır (Wiwatwitaya ve Takeda, 2005). Yaşam stratejileri; organizmaların fizyolojik, morfolojik ve davranış özellikleri ile sınırlı kaynakları kullanma, büyüme ve üremelerinin nasıl açıklanacağını çalışır. Yaşam stratejilerinin sınıflandırılması için r-K kavramları önemli bir yapıtaşdır (Quadros ve ark., 2009). Yaşam stratejileri bakımından genel olarak akarlar kuraklığa dayanıklı, üreme hızları yavaş (*K*-seçilimli) iken kolembolalar kuraklığa dayanıksız fakat üreme hızları yüksektir (*r*-seçilimli) (Lavelle ve Spain, 2001; Coleman ve ark., 2004). Ilıman otlaklarda, Akar ve kolembola biyokütlesi aynı iken tropikal otlaklarda akarların biyokütlesi kolembolaların 2 ile 5 katı olabilmektedir (Bartgett, 2005). Mikroeklembacaklıların orman tabanındaki ayrışma işlemi üzerinde dolaylı fakat önemli etkileri olduğu genel kabul görmektedir (Swift ve ark., 1979; Wardle, 2002; Coleman ve ark., 2004). Örnek olarak, kolembolalar ölü örtüdeki karbonu, toprak içerisine taşıyarak toprak organik maddesinin

bileşimini ve buna bağlı olarak da toprak içerisindeki mikrobiyal toplulukların yapısını etkilerler (Chamberlain ve ark., 2006). Bitki örtüsüne ve ölü örtü kalitesine (C/N) bağlı olarak mikroeklembacaklıların ılıman yapraklı ormanlarda yıllık ayrışma oranını arttırdığı bilinmektedir (Heneghan ve ark., 1998; Joo ve ark., 2006). Fakat ılıman ormanlarda meşe yapraklarının ayrışmasında mikroeklembacaklıların etkisinin düşük olduğu da belirtilmiştir (Joo ve ark., 2003). Bununla birlikte, ölü örtünün ilk ayrışmaya başladığı zamanlarda mikro ve mezoeklembacaklıların büyük miktarda solunuma ve kütle kaybına neden olduğu belirtilirken (Setälä ve Huhta, 1990) son çalışmalar mikro ve mezofaunanın toplam solunuma etkilerinin çok fazla olmadığını göstermiştir (Brussaard, 1998).

4.3. Ekosistem mühendisleri

İlk olarak Jones ve ark., (1994) tarafından tanımlanan "ekosistem mühendisleri", ekosistem süreçlerini ve bu süreçler içerisindeki canlıları derinden etkilerler (Jouquet ve ark., 2006). Ekosistem mühendisleri olarak adlandırılan Toprak solucanları, termit ve karıncalar biyotik ve abiyotik maddelerin fiziksel durumlarında yapmış oldukları değişim ile diğer türlerin besin kaynaklarını doğrudan veya dolaylı olarak değiştirirler (Jones ve ark., 1994; Jones ve ark., 1997). Bu nedenle besin ağı içerisindeki rollerinden çok ekosistem dinamiklerine ve ekosistem içerisindeki diğer canlıların yaşama ortamlarına yaptıkları değişiklikler çalışılmaktadır (Şekil 6). Ekosistem mühendisleri, toprağı taşır ve belirli fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik özelliklere sahip organomineral yapılar oluştururlar. Genellikle biyojenik olarak adlandırılan bu yapılar galeriler, karınca tepeleri, mantar yetiştirme odaları olabilir (Lavelle ve ark., 1997). Bu biyojenik yapıların inşası sırasında ekosistem mühendisleri toprağın agregatlaşması ve boşluk yapısını değiştirmesi sonucu toprağın hidrolojik özellikleri ile mikroorganizmaların kullanabildiği toprak organik maddesini etkilerler (Lavelle ve ark., 1997; Barros ve ark., 2001). Bu yüzden biyojenik yapıdaki ölü örtü ayrıştırıcılarının, predatörlerin ve mikroorganizmaların çeşitliliği ve miktarı, etraflarını saran topraktan farklıdır (Jouquet ve ark., 2006).

Ekosistem mühendislerinden olan karınca ve termitler topraktaki amonyum ve nitrat gibi mineral besinleri ve mikrobiyal aktiviteyi arttırmaktadır (Dauber and Wolters, 2000; Dauber ve ark., 2001;

Jouquet ve ark., 2006). Bu mühendisler tarafından yürütülen işlemler sonucunda ince toprak, organik madde ve değişebilir Ca, Mg, K ve Na katyonlarıyla zenginleştirilir. Solucanların makroagregat (>250µm) yapısındaki dışıkları toprağın karbon içeriğini zenginleştirir (Brussaard ve ark., 2007). Yukarıda bahsedilen etkileri sayesinde toprak verimliliği artar, biyojenik yapıları ve kullanılabilir besin maddeleri ile toprak üstünde farklı bitkisel peyzajlar oluştururlar (Kristiansen ve ark., 2001; Jouquet ve ark., 2004). Karşılaştırmalı çalışmalar karınca ve termit yuvalarının toprak özelliklerini değiştirdiğini ve bunun sonucunda bitkilerin morfolojilerini, gelişmelerini ve bitki komünite kompozisyonunu değiştirdiğini göstermiştir (Blomqvist ve ark., 2000; Folgarait ve ark., 2002; Jouquet ve ark., 2004).

5. Sonuç ve Öneriler

Karasal habitatlarda en fazla bulunan canlılar ayrıştırıcılar içerisinde yer alan omurgasızlar olmasına rağmen tür çeşitlilikleri, ekolojileri ve ekosistem süreçlerindeki rolleri hakkında yeterli bilgi bulunmamaktadır. Ülkemizde ise toprak içerisinde yaşayan ayrıştırıcı canlılardan özellikle eklembacaklılara (Collembola, Diplopoda, Isopoda, vb.) ait kayıtlar sınırlıdır.

Geleneksel olarak topraküstü ve toprakaltı ekosistem bileşenleri birbirlerinden ayrı tutulmasına rağmen son yıllarda yapılan çalışmalar ile bu iki ekosistemin geri bildirimler ile ekosistem süreçlerini ve özelliklerinin kontrolünde temel rol oynadıkları bilinmektedir. Bitkiler (üreticiler) ayrıştırıcı canlılara organik karbon sağlarken ayrıştırıcı canlılarda organik bitki artıklarını ayrıştırır ve besin elementlerini toprağa tekrar vererek bitki büyümesini ve komünite yapılarını dolaylı olarak düzenlerler (Wardle ve ark., 2004). Bu karşılıklı ilişkilerin detaylı incelenmesi, toprakaltı ve topraküstü ekosistemlerine ait besin ağlarının yapılması ve bu besin ağları arasındaki ilişkilerin ortaya konması gelecekte yapılması gereken çalışmalardır.

Toprak canlılarının çeşitlilikleri ve miktarları toprak içerisindeki süreçleri önemli derecede etkilerken, gübreleme ve yetiştirme ortamına yapılan

müdahaleler (Cole ve ark., 2006) toprak sıkışması ve toprak işleme gibi diğer antropojenik etkiler (Dittmer ve Schrader, 2000; Eaton ve ark., 2004; Frey ve ark., 2009) toprak canlılarının miktar ve komünite yapılarını dolaylı ve doğrudan etkilemektedir. Bu canlılar toprak içerisinde farklı nişlerde yaşarlar. Toprak faktörlerine olan tepkilerinden yola çıkılarak, mikroeklembacaklılar yalnız toprak sağlığını arttırmak için değil aynı zamanda genel ekosistemin sağlığı arttırmak için de kullanılabilir (Van Straalen, 1997; Longcore, 2003). Bu özellikleri ile çevresel gösterge olan türler çevre politikalarında, ekonomik gösterge olan türlerde ekonomi politikalarında hayati rol oynarlar (Van Straalen, 1998). Pek çok araştırmacı eklem bacaklıları kullanarak yetiştirme ortamı farklılıklarını ölçmüş ve yaşama ortamı kalitesini değerlendirmiştir. Eklem bacaklı grupları pek çok çevre şartında restorasyon başarısının izlenmesinde kullanılmaktadır (Nakamura ve ark., 2003). Bununla birlikte eklembacaklıların çevresel faktörlerin değişiminde biyogösterge olarak kullanılabilecekleri (Bird ve ark., 2004; Römbke ve ark., 2006) gibi ekosistemde kirlilik göstergesi olarak da (Cortet ve ark., 1999) değerlendirilmekte ve araştırmalarda kullanılabilmektedirler. Olası iklim değişimleri senaryolarında ve kirlilik izlemelerinde son yıllarda sıkça değerlendirilen ve üzerinde araştırmaların yapıldığı bir konu haline gelmiştir.

Toprak canlılarının ayrışma dinamiğindeki rolleri üzerine birçok çalışma olmasına rağmen toprak canlılarının yoğunluğu, çeşitliliği ve fonksiyonel yapısı ile ölü örtü çeşitliliği ve kalitesi arasındaki ilişki hakkında çok az deneysel veri bulunmaktadır (Smith ve ark., 2003). Ülkemiz biyoçeşitliliğinin çok zengin olmasına rağmen, toprak canlıları, çeşitlilikleri ve ekosistem süreçlerine etkileri hakkında hemen hemen hiçbir bilgi bulunmamaktadır. "Toprak ekolojisi"ne ait konuların çalışılması Ülkemiz biyoçeşitliliğine büyük katkı sağlayacağı gibi toprak içerisindeki süreçleri ve diğer süreçlerin belirsiz olan bölümlerini de anlamamızı sağlayacaktır. Geniş bir yelpaze içerisinde bulunan tek hücrelilerden büyük memelilere kadar olan canlıların besin ağları ve çevreleri ile olan etkileşimlerinin anlaşılması ile ekosistem süreçleri detaylı bir şekilde anlaşılacaktır. İşte o zaman ormancılık anlayışı doğaya yakın olacaktır.

References

- André, H. M., Ducarme, X., and Lebrun, P., 2002. Soil biodiversity: myth, reality or conning? *Oikos*. 96: 3-24.
- Ashwini, K.M. and K.R. Sridhar, 2005. Leaf litter preference and conversion by a saprophagous tropical pill millipede, *Arthrosphaera magna* Attems. *Pedobiologia*. 49: 307-316.
- Bardgett, R.D., 2005. The Biology of Soils: A Community and Ecosystem Approach. Oxford University Press, Oxford.
- Bardgett, R.D., W.D. Bowman, R. Kaufmann, and S.K. Schmidt, 2005. A temporal approach to linking aboveground and belowground ecology. *TRENDS in Ecology and Evolution*. 20: 634-641.
- Barros, E., P. Curmi, V. Hallaire, A. Chauvel, and P. Lavelle, 2001. The role of macrofauna in the transformation and reversibility of soil structure of an oxisol in the process of forest to pasture conversion. *Geoderma*. 100: 193-213.
- Berg, B. and R. Laskowski, 2006. Litter Decomposition: a Guide to Carbon and Nutrient Turnover. Academic Press, USA.
- Berg, B. and McLaugherty, 2008. Plant Litter, Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration. 2.ed. Springer. Berlin.
- Bird, S.B., R.N. Coulson, and R.F. Fisher, 2004. Changes in soil and litter arthropod abundance following tree harvesting and site preparation in a loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantation. *Forest Ecology and Management*. 202: 195-208.
- Blomqvist, M.M., H. Olf, M.B. Blaauw, T. Bongers, and W.H. van der Putten, 2000. Interactions between above- and belowground biota: importance for small-scale vegetation mosaics in a grassland ecosystem. *Oikos*. 90: 582-598.
- Brussaard, L., M.M. Puleman, E. Ouedraogo, A. Mando and J. Six, 2007. Soil fauna and soil in the fabric of the food web. *Pedobiologia*. 50: 447-462.
- Brussaard. L., 1998. Soil fauna, guilds, functional groups and ecosystem processes. *Applied soil Ecology*. 9: 123-135.
- Cardon, Z.G. and J.L. Whitbeck, 2007. The Rhizosphere An Ecological Perspective, Elsevier Inc., USA.
- Chamberlain, P.M., N.P. McNamara, J. Chaplow, A.W. Stott and H.I.J. Black, 2006. Translocation of surface litter carbon into soil by Collembola. *Soil Biology & Biochemistry*. 38: 2655-2664.
- Chapin, F.S., P.A. Matson and H.A. Mooney, 2002. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. Springer. New York.
- Cole, L. and R.D. Bardgett, 2002. Soil animals, microbial interactions and nutrient cycling. In: Lal, R. (Ed.), Encyclopedia of Soil Science. Marcel Dekker, New York, pp. 72-75.
- Cole, L., M.A. Bradford, P.J.A. Shaw and R.D. Bardgett, 2006. The abundance, richness and functional role of soil meso and macrofauna in temperate grassland – A case study. *Applied Soil Ecology*. 33: 186-198.
- Coleman, D.C., Jr. Crossley and D.A. Hendrix, P.F., 2004. Fundamentals of Soil Ecology, second ed. Elsevier Academic Press.
- Cortet J., A. Gomot-De Vaufflery, N. Poinso-Balaguera, L. Gomot, C. Texier and D. Cluzeau, 1999. The use of invertebrate soil fauna in monitoring pollutant effects. *European Journal of Soil Biology*. 35: 115-134.
- Curry, J.P. and O. Schmidt, 2007. The feeding ecology of earthworms – A review. *Pedobiologia*. 50: 463-477.
- Curtis, T.P., W.T. Sloan and J.W. Scannell, 2002. Estimating prokaryotic diversity and its limits. *PNAS*. 99: 10494-10499.
- Çakır, M and E. Makineci, 2009. Toprak mikro-eklembacaklılarının fonksiyonel yapıları ve ölü örtü ayrışmasına etkileri-Belgrad ormanı örneği. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*. 1: 135-140.
- Darwin, C., 1881. The formation of vegetable mould, through the action of worms, with observation on their habits. John Murray, London.
- Dauber, J. and V. Wolters, 2000. Microbial activity and functional diversity in the mounds of the three different ant species. *Soil Biology and Biochemistry*. 32: 93-99.
- Dauber, J., D. Schroeter and V. Wolters, 2001. Species specific effects of ants on microbial activity and N-availability in the soil of an old-field. *Eur. J. Soil Biol.* 37: 259-261.
- Dittmer, S. and S. Schrader, 2000. Longterm effects of soil compaction and tillage on Collembola and straw decomposition in arable soil. *Pedobiologia*. 44: 527-538.

- Doblas-Miranda, E., F. Sanchez-Pinero and A. Gonzales-Megias, 2007.** Soil macroinvertebrate fauna of a Mediterranean arid system: composition and temporal changes in the assemblage. *Soil Biology and Biochemistry*, 39, 1916-1925.
- Dunxiao, H., H. Chunru, X. Yaling, H. Banwang, H. Liyuan and M.G. Paoletti, 1999.** Relationship between soil arthropods and soil properties in a suburb of Qianjiang City, Hubei, China. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 18: 467-473.
- Eaton, R.J., M. Barbercheck, M. Budorf and W. Smith, 2004.** Effects of organic matter removal, soil compaction, and vegetation control on Collembolan populations. *Pedobiologia*. 48: 121-128.
- Endlweber, K. and S. Scheu, 2006.** Effects of Collembola on root properties of two competing ruderal plant species. *Soil Biology & Biochemistry*. 38: 2025-2031.
- Faber, J.H., 1991.** Functional classification of soil fauna: a new approach. *Oikos*. 62: 110-117.
- Folgarait, P.J., S. Perelman, N. Gorosito and R. Pizzio, 2002.** Effects of *Camponotus punctulatus* ants on plant community composition and soil properties across land-use histories. *Plant Ecol*. 163: 1-13.
- Frey, B., J. Kremer, A. Rüdtt, S. Sciacca, D. Matthies and P. Lüscher, 2009.** Compaction of forest soils with heavy logging machinery affects soil bacterial community structure. *European Journal of Soil Biology*. 45: 312-320.
- Hattenschwiler, S. and D. Bretscher, 2001.** Isopod effects on decomposition of litter produced under elevated CO₂, N deposition and different soil types. *Global Change Biology*. 7: 565-579.
- Heneghan, L., D.C. Coleman, X. Zou, Jr, D.A. Crossley and B.L. Haines, 1998.** Soil microarthropod community structure and litter decomposition dynamics: A study of tropical and temperate sites. *Applied Soil Ecology*. 9: 33-38.
- Hiski, T. and H. Takeda, 2008.** Soil microarthropods alter the growth and morphology of fungi and fine roots of *Chamaecyparis obtusa*. *Pedobiologia*. 52: 97-110.
- Hooper, D.U., F.S. Chapin, J.J. Ewel, A. Hector, P. Inchausti, S. Lavorel, J. Lawton, D.M. Lodge, M. Loreau, S. Naeem, B. Schmid, Seta" la", H., A.J. Symstad, J. Vandermeer and D.A. Wardle, 2005.** Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge. *Ecological Monographs*. 75: 3-35.
- Hopkin, S.P., 1997.** Biology of springtails, Oxford university press, New York.
- Jones, C.G., J.H. Lawton and M. Shachak, 1994.** Organisms as ecosystem engineers. *Oikos*. 69: 373-386.
- Jones, C.G., J.H. Lawton and M. Shachak, 1997.** Positive and negative effects of organisms as physical ecosystem engineers. *Ecology*. 7: 1946-1957.
- Joo, S.J., M.H. Yim and K. Nakane, 2003.** Leaf litter decomposition in relation to dynamics of soil mesofauna in litter boxes with different mesh sizes in a *Quercus serrata* forest. *Appl. For. Sci*. 12: 109-116.
- Joo, S.J., M.H. Yim and K. Nakane, 2006.** Contribution of microarthropods to the decomposition of needle litter in a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) plantation. *Forest Ecology and Management*. 234: 192-198.
- Jouquet, P., N. Boulain, J. Gignoux and M. Lepage, 2004.** Association between subterranean termites and grasses in a West African savanna: spatial pattern analysis shows a significant role for *Odontotermes n. pauperans*. *Applied Soil Ecology*. 97: 99-107.
- Jouquet, P., J. Dauber, J. Lagerlöf, P. Lavelle and M. Lepage, 2006.** Soil invertebrates as ecosystem engineers: Intended and accidental effects on soil and feedback loops. *Applied Soil Ecology*. 32: 153-164.
- Kampichler, C., J. Rolschewski, D.P. Donnelly and L. Boddy, 2004.** Collembolan grazing affects the growth strategy of the cord-forming fungus *Hypholoma fasciculare*. *Soil Biology & Biochemistry*. 36: 591-599.
- Kaneko, N., M.A. McLean and D. Parkinson, 1998.** Do mites and Collembola affect pine litter fungal biomass and microbial respiration?. *Applied Soil Ecology*. 9: 209-213.
- Kreuzer, K., M. Bonkowski, R. Langel and S. Scheu, 2004.** Decomposer animals (Lumbricidae, Collembola) and organic matter distribution affect the performance of *Lolium perenne* (Poaceae) and *Trifolium repens* (Fabaceae). *Soil Biology & Biochemistry*. 36: 2005-2011.

- Kristiansen, S.M., W. Amelung and W. Zech, 2001.** Phosphorus forms as affected by abandoned anthills (*Formica polyctena* Förster) in forest soils: sequential extraction and liquid-state ^{31}P -NMR spectroscopy. *J. Plant Nutr. Soil Sc.* 164: 49-55.
- Kühnelt, W., 1961.** Soil Biology. Faber and faber limited, London.
- Lavelle, P. and A.V. Spain, 2001.** Soil Ecology. Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- Lavelle, P., D. Bignell, M. Lepage, V. Wolters, P. Roger, P. Ineson, O.W. Heal and S. Dhillon, 1997.** Soil function in a changing world: the role of invertebrate ecosystem engineers. *European Journal of Biology.* 33: 159-193.
- Lavelle, P., T. Decaens, M. Aubert, S. Barot, M. Blouin, F. Bureau, P. Margerie, P. Mora, and J.P. Rossi, 2006.** Soil invertebrates and ecosystem services. *European Journal of Biology.* 42: 3-15.
- Longcore T., 2003.** Terrestrial arthropods as indicators of ecological restoration success in coastal sage scrub (California, U.S.A.). *Restoration Ecology.* 11: 397-409.
- Mittelbach, G.G., C.F. Steiner, S.M. Scheiner, K.L. Gross, H.L. Reynolds and R.B. Waide, 2001.** What is the observed relationship between species richness and productivity? *Ecology.* 82: 2381-2396.
- Moore, J.C., D.E. Walter and H.W. Hunt, 1988.** Arthropod regulation of micro and mesobiota in below-ground detrital food webs. *Ann. Rev. Entomol.* 33: 419-439.
- Nakamura A., H. Proctor and C.P. Catterall 2003.** Using soil and litter arthropods to assess the state of rainforest restoration. *Ecological Management & Restoration.* 4: 20-28.
- Pieper, S. and G. Weigmann, 2008.** Interactions between isopod and collembolans modulate the mobilization and transport of nutrient from urban soils. *Applied Soil Ecology.* 39: 109-126.
- Ponsard, S. and R. Arditi, 2000.** What can stable isotopes ($\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$) tell about the food web of soil macro-invertebrates? *Ecology.* 81: 852-864.
- Quadros, A.F., Y. Caubet and P.B. Araujo, 2009.** Life history comparison of two terrestrial isopods in relation to habitat specialization. *Acta Oecologica.* 35: 243-249.
- Reynolds, B.C., J. Hamel, J. Isbanioly, L. Klausman and K.K. Moorhead, 2007.** From forest to fen: Microarthropod abundance and litter decomposition in a southern Appalachian floodplain/fen complex. *Pedobiologia.* 51: 273-280.
- Root, R.B., 1967.** The niche exploitation pattern of the blue-gray gnatcatcher. *Ecol. Mon.* 37: 317-350.
- Römbke J., J.-P. Sousa, T. Schouten and F. Rieperdt, 2006.** Monitoring of soil organisms: a set of standardized field methods proposed by ISO. *European Journal of Soil Biology.* 42: 61-64.
- Ruiter, P.C.de. and J.C. Moore, 2004.** Food-Web Interactions. Encyclopedia of soils in environment. (Hiller, D., Rosenzweig, C., Powlson, D., Scow, K., Singer, M. ve Sparks, ed.), 59-67. Academic Press, Volume 2, USA.
- Rusek, J., 1998.** Biodiversity of Collembola and their functional role in the ecosystem. *Biodiversity and Conservation.* 7: 1207-1219.
- Scheu, S. and M. Falca, 2000.** The soil food web of two beech forests (*Fagus sylvatica*) of contrasting humus type: stable isotope analysis of macro- and a mesofauna dominated community. *Oecologia.* 123: 285-296.
- Scheu, S., 2002.** The soil food web: structure and perspectives. *European Journal of Soil Biology.* 38: 11-20.
- Schlesinger, W.H. and J.A. Andrews, 2000.** Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry.* 48: 7-20.
- Seeber, J., S. Scheu and M. Meyer, 2006.** Effects of macro-decomposers on litter decomposition and soil properties in alpine pastureland: A mesocosm experiment. *Applied Soil Ecology.* 34: 168-175.
- Setälä, H. and V. Huhta, 1990.** Evaluation of the soil fauna impact on decomposition in a simulated coniferous forest soil. *Biology and Fertility of Soil.* 10: 163-169.
- Smith, V.C. and M.A. Bradford, 2003.** Litter quality impacts on grassland litter decomposition are differently dependent on soil fauna across time. *Applied Soil Ecology.* 24: 197-203.
- Swift, M.J., O.W. Heal and J.M. Anderson, 1979.** Decomposition in terrestrial ecosystems. Blackwell, Oxford. 372 pp.

- Taylor, A.R., A. Pflug, D. Schröter and V. Wolters, 2010.** Impact of microarthropod biomass on the composition of the soil fauna community and ecosystem processes. *European Journal of Soil Biology*. 46: 80-86.
- Torsvik, V., L. Ovreas and T.F. Thingstad, 2002.** Prokaryotic Diversity—Magnitude, Dynamics, and Controlling Factors. *Science*. 296: 1064-1066.
- Toyota, A., N. Kaneko and M.T. Ito, 2006.** Soil ecosystem engineering by the train millipede *Parafontaria laminata* in a Japanese larch forest. *Soil Biology & Biochemistry*. 38: 1840-1850.
- Uchida, T., N. Kaneko, M.T. Ito, K. Futagami, T. Sasaki and A. Sumigoto, 2004.** Analysis of the feeding ecology of earthworms (Megascolecidae) in Japanese forests using gut content fractionation and $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ stable isotope natural abundances. *Applied Soil Ecology*. 27: 153-163.
- Van Straalen, N.M., 1997.** Community Structure of soil arthropods as a bioindicator of soil health. In: Pankhurst, C.E., Doube, B.M. ve Gupta, V.V.S.R. (Ed), *Biological indicators of soil health*. Cab International, UK, pp. 235-264.
- Van Straalen, N.M., 1998.** Evaluation of bioindicator systems derived from soil arthropod communities, *Applied Soil Ecology*. 9: 429-437.
- Walling, S.Z. and C.A. Zabinski, 2006.** Defoliation effects on arbuscular mycorrhizae and plant growth. *Applied Soil Ecology*. 32: 111-117.
- Wang, S., H. Ruan and B. Wang, 2009.** Effects of soil microarthropods on plant litter decomposition across an elevation gradient in the Wuyi Mountains. *Soil Biology and Biochemistry*. 41: 891-897.
- Wardle, D.A., 2002.** Communities and Ecosystems: Linking the Aboveground and Belowground Components. Princeton University Press, Princeton.
- Wardle, D.A., R.D. Bardgett, J.N. Klironomos, H. Setälä, W.H. Putten and D.H. Wall, 2004.** Ecological Linkages Between Aboveground and Belowground Biota. *Science*. 304: 1629-1633.
- Wiwatwitaya, D. and H. Takeda, 2005.** Seasonal changes in soil arthropod abundance in the dry evergreen forest of north-east Thailand, with special reference to collembolan communities. *Ecological Research*. 20: 59-70.
- Wolters, V., 2001.** Biodiversity of soil animals and its function. *European Journal of Soil Biology*. 37: 221-227.