

Orman Topraklarında Karbon Depolanması ve Türkiye'deki Durum

Doğanay TOLUNAY

İ.Ü. Orman Fakültesi Toprak İlimi ve Ekoloji Anabilim Dalı, 34473 Bahçeköy-İstanbul.

Tel: (212) 226 31 65; Fax: (212) 226 11 13; E-mail:dtolunay@istanbul.edu.tr

Aydın ÇÖMEZ

Orman Toprak ve Ekoloji Araştırmaları Enstitüsü 26160 Eskişehir.

E-mail: acomez@hotmail.com

ÖZET

Küresel iklim değişikliğine yol açan sera gazlarından CO₂'in atmosferden alınarak depolanması üzerinde orman ekosistemleri önemli bir etkiye sahiptir. Ancak karbon depolanması üzerinde sadece orman ağaçlarının önemli bir işlevi olduğu zannedilmekte, orman topraklarının etkileri ise göz ardı edilmektedir. Nitekim karasal ekosistemlerde depolanmış olan toplam 2500 milyar ton karbonun 2000 milyar tonu topraklardadır. Orman topraklarında tarım ve otlak topraklarına oranla daha fazla karbon biriktirilebilmektedir. Orman topraklarında karbon birikimi, yaprak dökümü ile organik madde girişi ve organik madenin ayrışması arasındaki ilişki ile belirlenmektedir. Gerek yaprak dökümü ve ölü örtü oluşması, gerekse bunların ve toprak içindeki organik karbonun ayrışması üzerinde iklim, yeryüzü şekli, ağaç türleri, meşcere özellikleri, silvikültürel müdahaleler, toprak özellikleri, arazinin işlenmesi, erozyon gibi çeşitli faktörler etkilidir. Bu çalışma ile topraktaki organik karbon stoğu üzerinde etkili olan faktörler incelenmiş ve Ülkemizde bu güne kadar yapılan araştırmalar derlenerek orman topraklarımızda depolanmış karbon miktarı belirlenmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak ülkemiz orman topraklarında 1159 toprak çukurundan elde edilen değerlere göre bir hektar alanda 77,8 ton kadar karbon depolandığı saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Karbon, toprak organik maddesi, orman, küresel iklim değişikliği

1.GİRİŞ

Önceleri çok tartışılan bir konu olan atmosferin ısınması ve bunun sonucunda iklim değişikliğinin oluşması, günümüzde hemen hemen herkes tarafından kabul edilmektedir. Hatta hava durumundaki en ufak değişiklik küresel ısınmaya, sera etkisine bağlanmaktadır. Atmosferin ısınmasına yol açan ve sera gazları olarak bilinen gazlar su buharı, karbondioksit (CO₂), metan (CH₄), diazotoksit (N₂O), hidroflorokarbonlar (HFC), perflorokarbonlar (PFC), kükürtheksaflorid (SF₆) ve ozon (O₃)'dur, bunlardan su buharı doğal süreçlerin sonucunda da oluşabilmektedir (IPCC 2007). Sera gazlarından özellikle CO₂'nin atmosferin ve yeryüzünün ısınması üzerindeki etkisi çok önemlidir. CO₂'in ve diğer sera gazlarının atmosferdeki miktarının artmasında insan faaliyetleri önemli bir rol oynamaktadır. Örneğin CO₂ sanayi devriminden önce atmosferde 280 ppm civarında bulunurken, 2005 yılında 379 ppm değerine ulaşmıştır (IPCC 2007). 2006 yılı itibarıyla atmosferdeki CO₂ oranının 381 ppm olduğu ve 2000-2006 yılları arasında yıllık olarak ortalama 1,93 ppm kadar arttığı bildirilmektedir (Canadell ve ark. 2007).

CO₂ ve diğer sera gazlarının atmosferdeki miktarlarının hızla artması, sera gazı emisyonlarının sınırlandırılması yönünde uluslar arası boyutta adımlar atılmasını

gerektirmiştir. Bunlardan 1992 yılında Rio'da imzalanan Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi ile 1997'de imzalanan ve Kyoto Protokolü olarak bilinen anlaşmalar ön plana çıkmaktadır. Türkiye İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'ni 2004 yılında kabul etmiştir. Kyoto Protokolü özetle ülkelerin sera gazı emisyonlarını 1990 yılındaki seviyelerinin altına çekmesini hedeflemektedir. Ama bazı gelişmiş ülkeler ile aralarında Türkiye'nin de olduğu gelişmekte olan bazı ülkeler, protokolün yürürlüğe girmesiyle ulusal çıkarları açısından sorunlar çıkacağı gerekçesi ile henüz protokolü imzalamamıştır. Kyoto Protokolü'nün getirdiği yeniliklerden birisi de kamuoyunda "karbon borsası" olarak bilinen emisyonlarını azaltmayan ülkelerin, emisyonlarını azaltan ülkelere kotalarını satın alabilmesidir. Bu sebeple ülkeler sera gazları emisyon ve depolanmaları ile ilgili olarak ulusal envanterlerini hazırlamaktadırlar. 2006 yılı itibarıyla içlerinde Türkiye'nin de bulunduğu yaklaşık 40 ülke ulusal raporlarını hazırlamıştır (UNFCCC 2008). Sera gazları ile ilgili olarak envanter düzenleyen ülkeler, Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından hazırlanan Arazi Kullanımı, Arazi Kullanım Değişikliği ve Ormanlık için Pratik Rehber (GPG-LULUCF) temel alınmaktadır (IPCC 2003). Bu rehber

göre çeşitli sektörler ile arazi kullanımından olan emisyonlar ve değişik arazi kullanımları tarafından depolanan karbon miktarları hesaplanmaktadır. Ülkemiz tarafından da 1990-2004 yıllarını kapsayan bir envanter hazırlanmıştır. Bu envantere göre 2004 yılında ülkemiz ormanları tarafından 14,5 milyon ton karbon bağlanmıştır. Bu yıllık olarak 53,1 milyon ton CO₂'ye eşdeğerdir (ÇOB 2006). Ancak bu envanterin hazırlanması sırasında bazı hatalar yapılmıştır. Örneğin ülkemizdeki çeşitli iklim tiplerinin belirlenmesi aşamasında, iklim tipleri yükseltile dikkate alınmadan belirlenmiştir. Diğer bir hata da amenajman planlarındaki ağaç serveti değerlerinin bitkisel kütleyle çevrilmesinde hacim yoğunluk değerleri yerine özgül yoğunluk değerlerinin kullanılmasıdır.

Atmosferde miktarı her geçen gün artan sera gazları karasal ekosistemler ve okyanuslar tarafından depolanmaktadır. Karasal ekosistemlerde toprak üstünde bağlanan karbonun % 80'inden fazlası, tüm toprak organik karbonunun da % 70'inden fazlası orman ekosistemleri tarafından bağlanmaktadır (Jandl ve ark. 2007). Bu durum orman ekosistemlerinin önemini daha fazla artırmıştır. Orman ekosistemleri ve diğer karasal ekosistemlerde karbon sanıldığı gibi aksine sadece bitkilerde depolanmamaktadır, topraklar da önemli bir depolanma yeridir. Bitkisel kütlede biriktirilen yıllık ve toplam karbon miktarının saptanması nispeten daha kolay olup, genellikle çapa bağlı olarak geliştirilen ve bitkisel kütle değerlerini veren formüllerle belirlenebilmektedir. Topraklarda biriktirilen toplam ve yıllık karbon miktarlarını belirlemek ise çok güçtür. Bu durum toprakların heterojen olması ve topraklarda karbon biriktirilmesi üzerinde birçok faktörün etkili olmasındandır.

Bu çalışmada öncelikle küresel karbon döngüsü ve orman ekosistemlerinin karbon depolanması üzerindeki etkileri kısaca açıklanmış, daha sonra orman topraklarında karbonun depolanması üzerine etkili faktörlere değinilmiş ve Ülkemizde yapılmış araştırmalardan yararlanılarak 1 m toprak derinliği için orman topraklarında bulunan organik karbon miktarı hesaplanmıştır.

2. KÜRESEL KARBON DÖNGÜSÜ

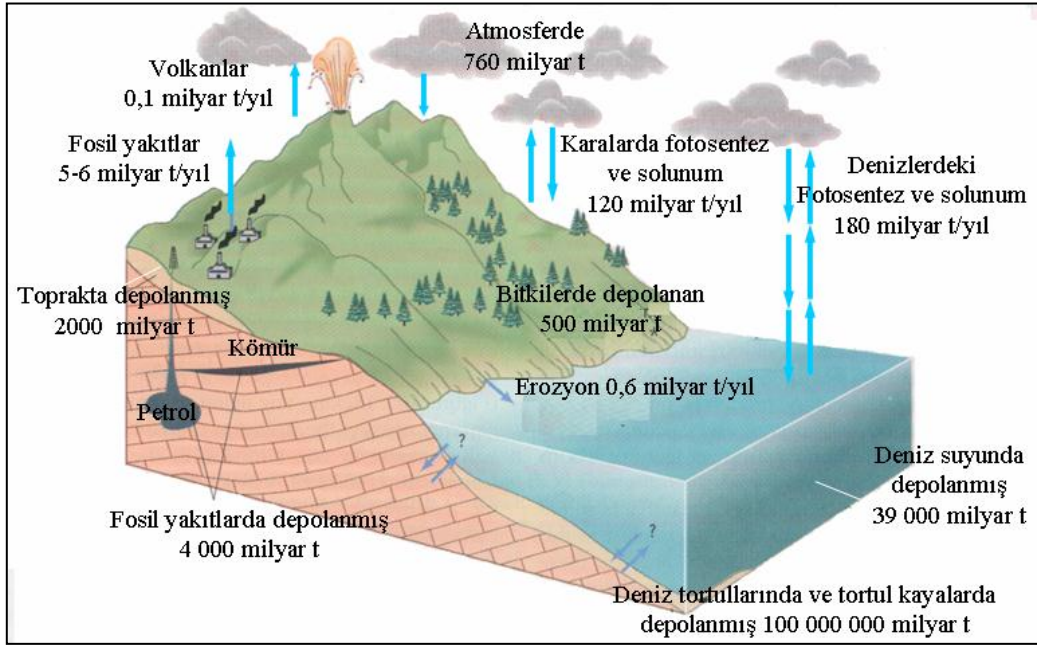
Karbonun atmosfer, canlılar ve karalar ile sular arasında yer değiştirmesi olayı karbon döngüsü olarak adlandırılmaktadır. Atmosferdeki karbon karalardaki ya da sulardaki fotosentez yapan canlılar tarafından (bitkiler, fitoplanktonlar gibi) bağlanmaktadır. Karbon daha sonra besin zinciri aracılığıyla fotosentez yapabilen canlılarla beslenen hayvanlara geçmektedir. Bu aşamadan sonra ya solunum ile atmosfere CO₂ olarak dönmekte ya da canlıların ölmesi ile toprakta veya sularda birikmektedir. Organik atıkların buralarda ayrışması ile tekrar CO₂ olarak atmosfere ulaşmaktadır. Küresel karbon döngüsünde karalardaki bitkiler tarafından yaklaşık 60 milyar ton karbon alınmakta ve bir bu kadar karbon da solunum ile atmosfere verilmektedir. Benzer şekilde okyanuslardaki canlıların

fotosentez ve solunumunda kullanılan karbon miktarı toplam 180 milyar tondur (Janzen 2004). Doğal koşullarda fotosentez ile bağlanan karbon solunum ile harcanan karbondan bir miktar daha fazladır. Böylece karbon canlılarda bitkisel veya hayvansal kütle olarak bağlanmaktadır. Karasal ekosistemlerdeki vejetasyonda depolanmış olan karbon miktarı 500 milyar ton dolaylarındadır. Karalarda karbon sadece bitkilerde değil aynı zamanda topraklarda da depolanmaktadır. Topraklarda depolanan karbon miktarı yaklaşık olarak 2000 milyar tondur (1 m derinlikteki topraklar için). Okyanuslarda depolanmış olan karbon ise 39 000 milyar ton civarındadır (Janzen 2004) (Şekil 1). Karbon ayrıca CaCO₃ gibi değişik formlarda inorganik olarak da depolanmış haldedir. Yeryüzündeki tortul kayalarda ve deniz diplerinde oldukça önemli miktarlarda inorganik formda karbon bulunmaktadır. İnorganik formdaki karbon küresel karbon döngüsü açısından çok önemli değildir. Yıllık olarak atmosferden alınarak bitkisel veya hayvansal kütlede biriktirilen karbonun 1990-1999 yılları arasında karalarda 1,4±0,5 milyar ton, okyanuslar ile denizlerde 1,7±0,7 milyar ton kadar olduğu tahmin edilmektedir (IPCC 2007). Böylece yıllık olarak toplam 3,1 milyar ton karbon atmosferden alınarak çeşitli şekillerde depolanmaktadır. Ancak buna karşılık ısınma, sanayi ve ulaşımda fosil yakıtların kullanılması ile atmosfere yıllık olarak 6,3 milyar ton (90'lı yılların ortalaması) karbon emisyonu olmaktadır. Neticede yıllık olarak atmosferdeki karbon miktarı 3,2 milyar ton kadar artmaktadır (IPCC 2007). Buraya kadar verilen bilgilerden de anlaşılacağı üzere, doğal koşullarda devam eden küresel karbon döngüsünde atmosferdeki karbonun bitkiler tarafından bağlandığı, topraklarda ve sularda depolandığı için sürekli olarak azalma eğiliminde olması beklenir. Ancak fosil yakıtlarda depolanmış olarak bulunan karbon, bu fosil yakıtların kullanılması ile karbon döngüsüne katıldığı için atmosferdeki miktarı sürekli artmaktadır.

Daha öncede değinildiği üzere orman ekosistemlerinde diğer karasal ekosistemlere oranla daha fazla karbon biriktirilmektedir. Tablo 1'de çeşitli biyomlarda birim alanda ve toplam olarak depolanmış karbon miktarları verilmiştir.

Ormanlarda biriktirilmiş karbon miktarı enlem derecelerine göre değişmektedir. Birim alanda toprak üstü bitkisel kütlede biriktirilen karbon miktarı tropikal kuşaktan boreal kuşağa doğru azalmaktadır. Orman topraklarında biriktirilen karbon miktarı ise tam tersi bir durum göstermekte, diğer bir ifadeyle tropikal ormanlarda boreal ormanlara nispeten daha düşük kalmaktadır (Lal 2005) (Tablo 1).

Toprak üstü bitkisel kütlede bir hektar alanda tutulan karbon miktarının kuzey enlemlerdeki boreal ormanlarda 40-60 ton, ılıman kuşak ormanlarında 60-130 ton tropikal ormanlarda ise 120-194 ton arasında değişebildiği, bozulmamış bir tropikal yağmur ormanında 250 tona kadar yükselebildiği bildirilmektedir (Dixon ve ark., 1994'e atfen Lal, 2005). Topraklarda depolanan karbon miktarı, karasal karbon



Şekil 1. Küresel karbon döngüsü (Botkin ve Keller 1995 ve Janzen 2004'ten değiştirilerek)

Tablo 1. Dünya üzerindeki biyomlarda vejetasyon ve topraklarda tahmini karbon stoku (Janzen 2004)

Biyomlar	Alan (milyar ha)	Toplam C Miktarı			Birim Alandaki C Miktarı	
		Bitki (milyar t)	Toprak (milyar t)	Toplam (milyar t)	Bitki (t/ha)	Toprak (t/ha)
Tropikal Ormanlar	1,76	212	216	428	120,5	122,7
Ilıman Bölge Ormanları	1,04	59	100	159	56,7	96,2
Boreal Ormanlar	1,37	88	471	559	64,2	343,8
Tropikal Savanlar ve Otlaklar	2,25	66	264	330	29,3	117,3
Ilıman Bölge Otlakları ve Çalılıklar	1,25	9	295	304	7,2	236,0
Çöller ve Yarı Çöller	4,55	8	191	199	1,8	42,0
Tundra	0,95	6	121	127	6,3	127,4
Tarım	1,6	3	128	131	1,9	80,0
Sulak Alanlar	0,35	15	225	240	42,9	642,9
TOPLAM	15,12	466	2011	2477	30,8	133,0

stokunun, boreal ormanlarda % 85'ini, ılıman kuşak ormanlarında % 60'ını ve tropikal yağmur ormanlarında % 50'sini oluşturmaktadır (Dixon ve ark., 1994'e atfen Lal, 2005). Birim alandaki toprak/bitki karbonu stoğu oranı yukarı enlemlerde 3-17, orta enlemlerde 1.2-3, aşağı enlemlerde ise 0.9-1.2 arasında değişebilmektedir (Lal, 2005). Değerlerden de anlaşılacağı üzere ülkemizin de içinde yer aldığı enlem kuşağında topraklarda depolanmış karbon miktarı, bitkisel kütledeki stoktan daha fazladır.

3. ORMAN TOPRAKLARINDA KARBON BİRİKİMİ

Orman ekosisteminde karbon girdisi fotosentez yolu ile olmaktadır. Atmosferdeki CO₂ bitkiler (ağaç, ağaççık, çalı, ot, yosun vb) tarafından alınarak öncelikle karbonhidrat şeklinde bağlanmakta, ayrıca diğer organik bileşiklere dönüştürülmektedir. Bir anlamda karbon canlıların yapı taşıdır ve bitkilerde canlı organik

maddenin yaklaşık % 50'sini oluşturmaktadır. Ancak ölü organik atıklarda ayrışma başladığı için karbon değerleri daha düşüktür.

Bitkilerde depolanmış karbon, ya ölü organların toprak üzerinde birikmesi ile ölü örtüyü oluşturmaktadır, ya da hayvanlar tarafından yenilerek bunlara geçmekte ve solunum ile atmosfere dönmektedir. Bitkisel kütle odun hammaddesi üretimi ve diğer bitkisel kökenli ürünlerin toplanması ile ekosistemin dışına çıkmaktadır. Bu sırada oluşan kesim artıkları da toprak üzerindeki ölü örtüyü karıştırmaktadır. Ölü örtüdeki organik maddeler ya burada ayrışarak CO₂ şeklinde atmosfere dönmekte, ya da bu ölü örtünün ayrışması sonucunda oluşan humus ile diğer ayrışma ürünleri mineral toprağa yağış suları ile sızmakta veya biyolojik faaliyet sonucunda karıştırılmaktadır (Kantarci 2000). Böylece organik karbon toprakta depolanmaktadır. Toprak organik maddesinin kaynağı genellikle ölü örtü olduğu için toprağın üst kesimi (Ah-horizonu) organik madde

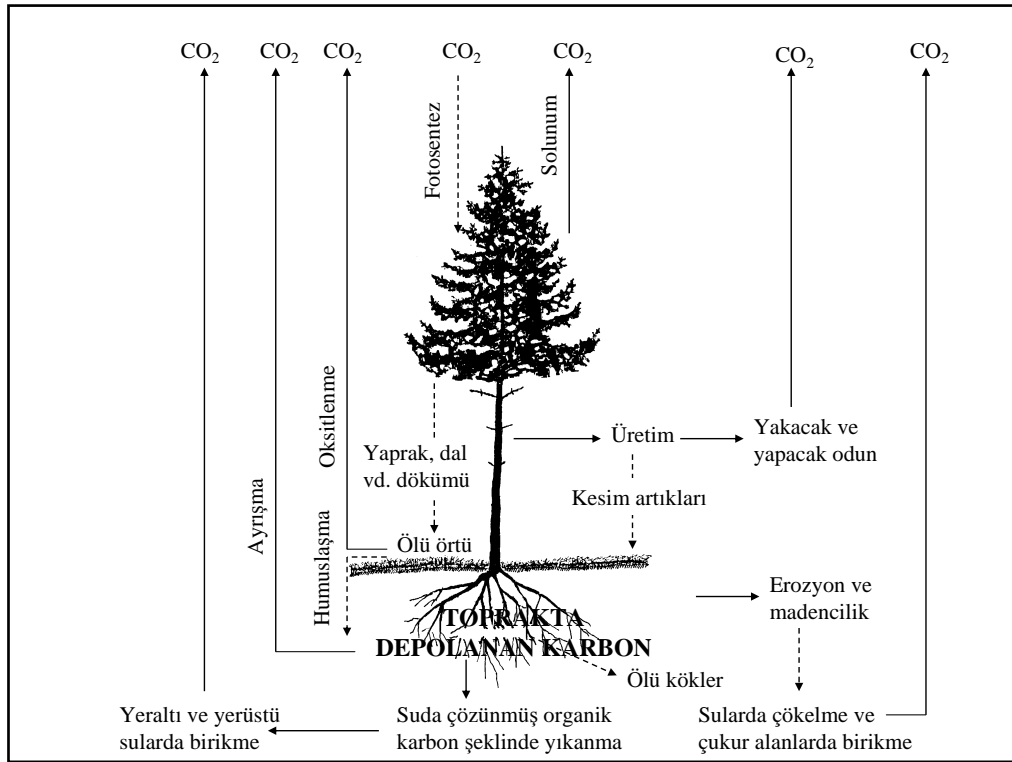
bakımından zengindir ve derinlik arttıkça organik karbon azalmaktadır. Ayrıca ölü kökler ve toprakta yaşayan canlıların ölü artıkları da toprak organik maddesine eklenmektedir. Orman topraklarında biriken karbon toprak içinde de ayrışmaya devam etmektedir. Toprak organik karbonunun ayrıştırılmasında bakteriler ve mantarlar gibi toprak canlılarının önemli rolü bulunmaktadır. Toprak canlıları toprak içindeki organik maddeleri ayrıştırmaktadır ve karbon CO₂ halinde atmosfere geri dönmektedir. Bu olay toprak solunumu olarak adlandırılmaktadır. Toprakta karbon kaybı sadece toprak solunumu ile meydana gelmemektedir. Çeşitli karbon molekülleri çözünmüş organik karbon şeklinde sızıntı suları ile yıkanabilmekte, taban suları, yeraltı suları, akarsular, göller ve hatta denizlerde birikebilmektedir. Topraklarda depolanmış olan organik karbon, her ne kadar orman ekosistemlerinde çok fazla olmasa da erozyon ile de sistem dışına çıkabilmektedir. Orman ekosistemlerinin tarım alanına dönüştürülmesi halinde toprakta depolanmış karbon miktarı azalmaktadır. Bu duruma ölü örtünün yok olmasıyla toprak organik maddesi kaynağının ortadan kalkması, toprakların işlenmesi ile organik maddenin daha hızlı bir şekilde ayrışması ve erozyon ile organik maddece zengin üst toprakların taşınması yol açmaktadır. Ek olarak açık maden işletmeciliğinin yapıldığı alanlarda da topraklar tahrip olmaktadır. Gerek erozyon ve gerekse açık maden işletmeciliği ile topraklardaki organik karbon orman ekosisteminde uzaklaşsa da genellikle başka yerlerde (göller, denizler, çukur alanlar vb) depolanmaktadır. Bu şekilde yer değiştiren toprak organik maddesi ve buna bağlı olan karbon, birikme alanlarından hemen atmosfere geri dönmez (Lal 2004) (Şekil 2).

Toprak organik maddesinin asıl kaynağı ölü örtü ayrışması sonucunda toprağa sızan veya karışan organik maddedir. Bu sebeple ölü örtü ayrışması ile toprak organik maddesi arasında bir ilişki mevcuttur. Ölü örtü oksitlenme ve humuslaşma olarak adlandırılan iki farklı şekilde ayrışmaktadır.

Ölü örtüdeki organik maddeler sıcaklık, hava, nem, besin maddeleri (tuzlar) ve ortamın reaksiyonu (pH) faktörlerinin optimumda olması durumunda oksitlenerek mineralize olmaktadır. Organik maddelerin oksitlenmesi sonucunda karbon CO₂'e, hidrojen H₂O'ya, azot NO₂⁻ ve NO₃⁻'a, kükürt SO₃⁻² ve SO₄⁻²'a, fosfor PO₄⁻³'a dönüşmektedir. Oksidatif ayrışma organik maddelerin tam olarak fakat ağır ağır yanması (oksidasyonu) olayıdır (Kantarıcı 2000). Bu sırada organik maddelerin içerdiği bitki besin maddeleri de (Mg, Fe, N, S vb) açığa çıkmaktadır (Schachtschabel ve ark. 2007).

Organik maddelerin ayrışması için gerekli şartlardan birisinin optimumdan uzaklaşması halinde oksidatif ayrışma engellenmektedir. Bu defa organik maddelerin çürüyüp kokuşması ve giderek humuslaşması daha sonra da yavaş yavaş mineralize olması söz konusudur. Bu şekilde safha safha ilerleyen organik madde ayrışması olayı humuslaşma (humifikasyon) olarak tanımlanmaktadır (Kantarıcı 2000).

Ölü örtünün mineralizasyonu ve humuslaşması üç aşamada gerçekleşmektedir. Öncelikle bitkisel organların ölmesinden hemen önce veya sonra yüksek polimer bileşikler yapı taşlarına parçalanmaktadır



Şekil 2. Orman ekosistemlerinde karbon döngüsü (Lal 2004'ten değiştirilerek) (düz çizgiler karbon çıktısını, kesik çizgiler karbon girdisini göstermektedir)

(örneğin nişasta şekerlere); yumurta akı maddeleri aminoasitlere veya klorofil feofitine dönüşmektedir (Schachtschabel ve ark. 2007). Bu reaksiyonlar sonucunda sonbaharda dökülen yaprakların rengi değişmektedir. İkinci evrede yaprakların toprak hayvancıkları tarafından parçalanması ve kısmen yenilmesi söz konusudur. Parçalanmış ve yenilen yaprak vb. maddeler mikroorganizmalar tarafından ayrıştırılmağa çalışılmaktadır (Kantarıcı 2000). Üçüncü evrede parçalanmış ve küçültülmüş organik artıklar mikroorganizmalar tarafından değişime uğratılmaktadır. En kolay parçalanabilenler suda çözünebilir karbonhidratlar, pektinler ve yumurta akı maddeleridir. Bitkisel atıkların veya ölü örtünün selüloz ve lignince zengin kısımlarının ayrışması oldukça uzun sürmektedir. Lignin ve selüloz mantarlar ile bakteriler tarafından ayrıştırılmaktadır (Schachtschabel ve ark. 2007). Böylece çürüntü tabakası giderek dokusal yapısını kaybetmekte ve hangi bitki kısmına ait olduğu belirlenemeyecek durumda amorf ve kolloidal karakterli humusa dönüşmektedir (Kantarıcı 2000). Organik maddenin ileri derecede ayrışmasından sonra humik maddeler oluşmaktadır. Humik maddeler çoğunlukla kahverengi siyah renkli, yüksek molekül ağırlığına sahip sekonder olarak oluşmuş organik bileşiklerdir (Berg ve Laskowski 2005). Bunların yüzey genişliği oldukça fazla olup, su ve besin maddelerini değiştirebilir şekilde tutabilmektedirler. Humik maddeler birbirlerine yapışmış ya da kil ve oksitlere bağlanmış şekilde bulunmaktadır (Schachtschabel ve ark. 2007). Organik madde içindeki aminoasitler, karbonhidratlar, reçine, basit organik asitler gibi bazı bileşikler ise humik olmayan maddeler olarak isimlendirilmektedir. Humik maddeler fulvik asitler, humik asitler ve huminler olarak üç grupta toplanmaktadır. Toprak ve ölü örtüde bulunan organik maddelerin humik ve humik olmayan olarak sınıflandırılması, organik maddelerin temelini oluşturan karbonun kararlı (stabil) veya kararsız (labil) olması ile ilgilidir. Kararsız toprak organik karbonu toprak organik karbonunun birkaç yıldan kısa bir sürede ayrışan kısmı olarak tanımlanmaktadır; kararlı toprak karbonunun ayrışması ise binlerce yıl sürebilmektedir (Parton ve ark. 1987, Zou ve ark. 2005). Toprak ve atmosfer arasındaki CO₂ akışı kararsız toprak organik karbonun oksitlenmesi ile yönlendirilmektedir (Zou ve ark. 2005). Kararsız toprak organik karbonun fiziksel veya kimyasal bir sınıflandırılmasının mümkün olmadığı, ancak aminoasitlerin, basit karbonhidratların, mikrobiyal biyomasın ve diğer bazı basit organik bileşiklerin kararsız toprak organik maddesi olarak kabul edilebileceği bildirilmektedir (Zou ve ark. 2005). Yine aynı yazarlar tarafından kararsız toprak organik karbonunun biyolojik olarak sınıflandırılabilirliği belirtilmekte ve kararsız toprak organik karbonu topraktaki mikroorganizmalar tarafından kimyasal olarak parçalanabilen ve fiziksel olarak alınabilen karbon olarak tanımlanmaktadır.

Humik olmayan maddeler birkaç yıl (çoğunlukla 5 yıldan daha kısa) içinde ayrışırken, Humik maddeler ise yüzlerce hatta binlerce yıl toprakta kalabilmektedir. Humik maddelerden huminler ve humik asitler ise

kararlı toprak karbonu olarak sayılmaktadır. Schachtschabel ve ark. (2007)'nin bildirdiğine göre bir çernozem toprağında humin asitlerinin 4900, huminlerin ise 2900 yaşında oldukları belirlenmiştir. Söz konusu topraktaki fulvik asitlerin ise 1800 yaşında oldukları bulunmuştur. Ancak humik asitler ve huminler suda çok zor çözünürken, fulvik asitler nispeten daha kolay çözünmektedir (Schachtschabel ve ark. 2007). Bu sebeple fulvik asitler sızıntı suyu ile suda çözünmüş organik karbon şeklinde taşınabilmektedir.

4. ORMAN TOPRAKLARININ KARBON BİRİKTİRMESİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Orman topraklarının organik madde içerikleri çeşitli doğal ekolojik koşullara ve insan etkisine bağlı olarak değişmektedir. Aşağıda açıklanan bu faktörler çoğunlukla ölü örtü ile daha kolay ayrışan topraktaki kararsız (labil) organik karbon miktarı üzerinde etkilidir.

Mevki faktörleri daha çok iklim ile ilişkilidir. İklimin soğuk ve nemli olmasıyla ölü örtü ve toprak organik maddesinin ayrışması yavaşlamakta, başka bir ifadeyle karbon toprakta depolanmaktadır. Ilıman ve tropikal iklim koşullarında ise organik madde hızla ayrışmaktadır. Soğuk ve nemli iklimlerde toprakta daha fazla karbon birikmektedir (Bkz Tablo 1).

Yeryüzü şekli özelliklerinden yükselti yine iklim özelliklerine etki ettiği için toprak organik karbonu üzerinde etkilidir. Yükselti arttıkça sıcaklığın azalması ve yağışın artması ölü örtünün ayrışma koşullarını değiştirdiği için, toprak organik maddesi de etkilenmektedir. Çok eğimli alanlarda ölü örtü ve üst toprak taşındığı için topraklarda daha az karbon depolanmaktadır. Güney ve kuzey bakı gurupları arasında da iklim farklarından dolayı ölü örtüdeki karbon miktarı farklı olabilmektedir. Kuzey bakılar daha nemli olduğu için topraklarda genellikle daha fazla karbon biriktirebilmektedir.

Orman ağaçlarından bazılarının yaprak ve odunları daha zor ayrışmaktadır. Örneğin kayın ormanlarında yaprak özelliklerinden dolayı ölü örtü ayrışması daha yavaş olabilmektedir (Kantarıcı 2000). Hatta kayının altında orman gülünün bulunduğu ekosistemlerde ham humus oluşumu sebebiyle organik madde ölü örtüde birikmekte, topraklardaki organik karbon miktarı ise ölü örtünün ayrışmaması ve toprakla karışmamasından dolayı daha az olabilmektedir. Sığ kök sistemine sahip ağaçlar da daha az karbon biriktirebilmektedir.

Ormanın kuruluş özelliklerinden yaş, kapalılık, sıklık, karışım oranı gibi özellikler de toprak organik maddesini etkilemektedir. Kapalı ormanlarda gerek meşcere içine ulaşan ışık ve sıcaklığın az olması, gerekse ağaçlardan daha fazla yaprak dökümü gerçekleşmesi sebebiyle depo edilen karbon miktarının fazla olması beklenebilir. Aynı sebeplerden dolayı ormanın yaşına bağlı olarak da topraklarda depolanan karbon miktarı artabilmektedir. Karışık ormanlarda ise

mikrobiyolojik faaliyet daha fazla olduğu için ve daha uygun ekolojik koşullardan dolayı ölü örtü ayrışması daha hızlıdır.

Ölü örtüdeki organik maddelerin, selüloz, hemiselüloz, lignin, protein, tanen, kütin, reçine vb bileşiklerin miktarı ölü örtü ayrışması üzerinde etkilidir. Lignin içeriği fazla olan organik maddelerin ayrışması daha uzun zaman almaktadır. Ayrıca ölü örtü ayrışma koşullarına (nem, sıcaklık, hava, pH, besin maddeleri) bağlı olarak ölü örtü ayrışma hızı değişmektedir. Ölü örtünün ayrışma hızı C/N oranı ile belirlenebilmektedir. Bu oran düşükse (<15) ölü örtü oksitlenme ile hızla ayrışmaktadır ve karbon CO₂ olarak havaya karışmaktadır. C/N oranının çok yüksek (>25) olması ölü örtünün yavaş ayrıştığı anlamına gelmektedir (Kantarci 2000). Bu durumda ise toprağa ulaşan karbon miktarı azalmaktadır.

Anakaya ve toprak özellikleri de ölü örtü ve toprakta depolanan karbon miktarı üzerinde bazı etkilere sahiptir. Anakayanın etkisi toprak özellikleri üzerinde etkili olması sebebiyle dolaylıdır. Ancak örneğin çatlaklı yapıdaki anakayalarda çatlak sisteminde köklerin daha iyi gelişmesi sonucunda toprak organik maddesi daha fazla olabilmektedir. Topraklarda depolanan karbon miktarı üzerinde etkili olan önemli toprak özellikleri toprak türü, derinlik, taşlılık, toprak nemi, pH, baz doygunluğu ve besin maddesi içeriği, geçirgenlik ve havalanma olarak sıralanabilir. Toprak türü özellikle kararlı (stabil) karbon moleküllerinin bağlanması açısından önemlidir ve killi topraklarda kararlı organik karbon daha fazla depolanabilmektedir. Toprağın iskelet kısmında organik karbon bağlanamadığı için taşlı topraklarda daha az karbon biriktirilmektedir. Asit topraklarda mikrobiyolojik faaliyet azaldığından dolayı organik maddeler ayrıştırılamamaktadır. Toprakların besin maddesince zengin olması durumunda ağaçlar tarafından daha fazla bitkisel kütle üretimi yapılabilmektedir. Dolayısıyla dökülen yaprak miktarı da fazla olmaktadır. Toprakların havalanmaması, durgunsu veya tabansuyu oluşumlarının bulunması durumunda toprak organik maddesi ayrışmamaktadır. Böylece daha fazla karbon biriktirilmektedir (Bkz Tablo 1 sulak alanlar)

Arazi kullanımı ve arazi kullanımında meydana gelen değişimler topraktaki organik karbon stoğu üzerinde etkili olmaktadır. Örneğin, tarım topraklarında daha az karbon depolanmaktadır. Bunun sebebi bitkisel kütle hasat ile uzaklaştırılması ve sürekli işleme ile toprağın havalanması, böylece organik maddenin ayrışarak tuttuğu karbonun atmosfere salınmasıdır. Buna karşılık orman ve otlak topraklarında daha fazla karbon depolanabilmektedir. Dolayısıyla arazi kullanımındaki değişiklikler, toprak organik karbon stoğunun azalmasındaki en önemli etkenlerden sayılmaktadır.

Bir arazinin ağaçlandırılması toprak organik maddesini olumlu veya olumsuz yönde etkileyebilir. Üzerinde bitki örtüsü bulunmayan bir alanda yapılacak ağaçlandırmalar ile toprak organik maddesi artırılabilir. Ancak bir orman

ekosisteminin tıraşlanması ve yeniden ağaçlandırılması toprak organik maddesinin azalmasına yol açabilir.

Amenajman yöntemleri de topraktaki organik karbon stoğu üzerinde etkili olabilmektedir. Seçme ormanlarında, aynı yaşlı ormanlara göre toprak organik maddesi daha fazla olabilmektedir. Yapılan bir araştırmada idare süresinin uzatılmasının toprak organik karbon stokunu artırdığı belirlenmiştir (Schulze ve ark. 1999'a atfen Jandl ve ark. 2007).

Ormanlarda yapılan silvikültürel müdahaleler genellikle mikro iklimi değiştirmektedir. Ayrıca yaprak dökümünün azalmasına sebep olmaktadır. Bu yüzden toprak organik karbonunda azalma meydana gelebilmektedir.

Orman yangınları bitkisel kütle ve ölü örtünün yanmasına yol açtığı için genel olarak toprak organik karbonun azalmasına sebep olmaktadır.

Arazi işleme (toprakların sürülmesi) dikilen fidanların daha hızlı gelişmesini, toprak üstü ve toprak altı bitkisel kütle gelişimini artırdığı için toprak organik karbon stoğunu artırabilmektedir. Ancak organik maddece zengin toprakların işlenmesi halinde, toprağın hava kapasitesinin artması, artan sızıntı suyu etkisi ile organik maddenin daha fazla ayrışması ve sızıntı suları ile karbonun taşınması da mümkün olabilmektedir.

Gübreleme ve kireçleme; toprak organik karbon miktarı üzerinde olumlu ve olumsuz yönde etki yapabilmektedir. Bir yandan hem gübreleme hem de kireçleme bitkilerin daha fazla besin maddesi almalarını, dolayısıyla daha fazla bitkisel kütle üretimi sağlamaktadır. Dolayısıyla topraktaki organik karbon miktarı artabilmektedir. Diğer yandan özellikle azot gübrelemeleri bitkisel artıkların azot içeriklerinin artmasına ve daha hızlı ayrışmalarına yol açmaktadır. Kireçleme ile pH yükseltildiği için ölü örtü ayrışması artmaktadır. pH ıslahı ile mikrobiyolojik faaliyet artmakta ve toprak solunumu ile karbon kaybı olabilmektedir. Ayrıca sızıntı suyu ile çözünmüş organik karbon kaybı da olmaktadır (Jandl ve ark. 2007)

Erozyon, ölü örtünün ve toprağın taşınmasına yol açtığı için toprak organik karbon içeriğinin azalmasına sebep olmaktadır. Özellikle organik karbon içeriği yüksek olan üst toprak tabakasının taşınması ile karbon stoğu azalmaktadır. Küresel olarak yılda 0,6 milyar ton karbonun denizlere taşındığı tahmin edilmektedir (Botkin ve Keller 1995).

Küresel iklim değişiminin toprak organik karbonu üzerindeki etkilerinin karmaşık olduğu ifade edilmektedir (Lal 2005). İklim değişikliği ekosistem verimliliğini, toprak altı bitkisel kütle-toprak üstü bitkisel kütle oranını ve mikroorganizmaları etkileyebilmektedir (Joyse ve Birdsey 2000'e atfen Lal 2005). Örneğin, kuzeydeki en az bozulmuş ormanlarda dikili bitkisel kütle (toprak üstü karbon stoğu),

artacağı ve toprak organik karbonu stoğunun ise azalacağı tahmin edilmektedir (Morgan ve ark., 2001' e atfen Lal 2005).

Görüldüğü gibi toprak organik karbonu üzerinde birçok faktör etkilidir. Dolayısıyla bir orman ekosistemindeki mevcut toprak karbon stoğu, bu faktörlerin ortak etkileşiminin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla bir ekosistemde depolanan toprak organik karbonu miktarını tahmin etmek çok güçtür. Buna karşılık köklerde ve toprak üst bitkisel kütlede depolanan karbon miktarı çeşitli ampirik formüller aracılığıyla tahmin edilebilmektedir (örneğin, $\text{çap}_{1,30 \text{ m}}$ veya hacme göre). Ancak topraklarda biriktirilen karbonun ağaç serveti veya diğer ağaç-meşcere özellikleri ile matematiksel denklemler oluşturularak ortaya konulması oldukça zordur.

5. TÜRKİYE ORMAN TOPRAKLARINDAKİ KARBON MİKTARLARI

Türkiye'de orman topraklarında depolanan karbon miktarı ile ilgili çalışma bulunmadığı gibi bir yanığı mevcuttur. Ancak uzun yıllardır toprakların karbon içerikleri çeşitli araştırmalarda incelenmiştir. Bu sebeple Türkiye'de orman topraklarında yapılmış çalışmalar derlenmiştir. Derlemede, 1 m derinliğe kadar toprak çukurlarının açıldığı, derinlik veya horizonlara göre hacim silindirleri ile toprak örneklerinin alındığı ve Walkley-Black yöntemi ile toprakların organik karbon içeriklerinin belirlendiği araştırmalar kullanılmıştır. Çeşitli araştırmacılar tarafından verilen topraklardaki organik karbon değerleri birim alan için (1 ha) yeniden hesaplanmıştır. Yapılan bu derleme sonucunda Türkiye'de değişik ormanlarda açılan 1159 adet toprak çukurunda topraktaki organik karbon stoğunun 0,8-448 t/ha arasında değiştiği, ağırlıklı ortalamanın ise 77,8 t/ha olduğu belirlenmiştir (Tablo 2-8).

Özellikle yapraklı ormanlarımız ve ağaçlandırma alanlarımızla ilgili veri daha da azdır. Ancak kaba bir hesapla 21,2 milyon ha orman alanımız olduğu ve 1 ha orman alanında topraklarda ortalama 77,8 ton karbon depolandığından hareketle orman topraklarımızda 1,65 milyar ton karbonun depolanmış olduğu söylenebilir.

Yıllık olarak biriktirilen karbon miktarının belirlenmesi ise ayrı bir sorundur ve bu konuda halen metodoloji belirsizdir. Bu konuda kullanılan yöntemlerden birisi aynı alanda farklı zamanlarda belirlenmiş olan toprak organik karbon stoklarının karşılaştırılmasıdır (Lal 2005). Bu konuda ülkemizde 1 m toprak derinliği ve 10 yıllık bir dönem için yapılmış tek bir çalışma mevcuttur. Buna göre Bolu Aladağ'daki 2001 yılında 32 yaşında olan Sarıçam ormanlarında 1991-2001 yılları arasında yıllık ortalama topraklarda 0,65 t/ha kadar karbon biriktirildiği hesaplanmıştır (Tolunay 2004). Küresel ölçekte ise orman topraklarının ortalama olarak yılda 0,4 t/ha karbon biriktirdikleri belirtilmektedir (Lal 2005). Bu ortalama değere göre ülkemiz orman topraklarında yıllık 8,48 milyon ton karbon biriktirilebileceği sonucuna ulaşılır. 2004 yılı için ormanlarımızda bitkisel kütlede depolanan karbon miktarının 14,48 milyon ton olarak hesaplandığı dikkate alındığında, orman topraklarının karbon depolama üzerindeki etkilerinin önemi daha anlaşılacaktır. Ancak üzerinde durulması gereken konu orman toprakları karbon için bir depo olabileceği gibi aynı zamanda emisyon kaynağı da olabileceğidir. Başka bir ifadeyle orman topraklarından, arazi kullanımındaki değişiklikler, amenajman yöntemleri, silvikültürel uygulamalar ve iklim özelliklerine bağlı olarak karbon depolanması yerine, organik maddenin hızlı ayrışması sonucunda atmosfere CO₂ de verilebilmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Atmosferdeki CO₂ ve diğer sera gazlarının artması ve bunun yol açtığı iklim değişikliğinin dünyayı bekleyen en büyük tehlikelerden biri olduğu açıktır. Orman ekosistemleri atmosferdeki CO₂'nin azaltılması yönünde en önemli araçtır. Ormanlarda karbon hem bitkiler tarafından, hem de topraklar tarafından depolanabilmektedir.

Küresel iklim değişikliğinin engellenebilmesi için yapılabilecek çok şey vardır. Bunların başında sera gazı emisyonlarının azaltılması gelmektedir. Ancak yakın bir gelecekte bu mümkün görünmemektedir. CO₂'nin azaltılması için diğer bir yaklaşım, enerji ihtiyacının karşılanması için fosil yakıtlar yerine bitkisel kütle

Tablo 2. İbrelili ormanlarda topraktaki organik karbon miktarları (t/ha)

Ağaç Türü	Profil Sayısı	En Düşük (t/ha)	En Yüksek (t/ha)	Ağırlıklı ort. (t/ha)	Kaynaklar
Sarıçam	288	18,3	448,0	78,0	Çepel ve ark. 1977, Tolunay 1992, Tolunay 1997, Tolunay 2004, Çelik 2006, Güner 2006
Karaçam	219	6,7	296,5	71,6	Kantaracı 1979a, Eruz 1984, Sevgi 2003, Özkan 2003, Karatepe 2004, Çelik 2006
Sedir	70	12,6	273,1	85,7	Özkan 2003, Başaran ve ark. 2007
Ardıç	63	0,8	245,9	64,4	Özkan 2003, Çelik 2006, Başaran ve ark. 2007
Ladin	58	2,0	283,2	82,0	Kalay 1989, Altun 1995
Uludağ Göknarı	35	65,5	196,2	101,8	Kantaracı 1978, Kantaracı 1979b
Kızılçam	16	29,6	160,5	77,1	Duran 1991, Çelik 2006
Toros Göknarı	2	68,4	96,8	82,6	Özkan 2003
TOPLAM	751	0,8	448,0	77,1	

Tablo 3. Yapraklı ormanlarda topraktaki organik karbon miktarları (t/ha)

Ağaç Türü	Profil Sayısı	En Düşük (t/ha)	En Yüksek (t/ha)	Ağırlıklı ort. (t/ha)	Kaynaklar
Meşe	97	5,1	279,1	82,3	Kantarıcı 1974, Özhan 1977, Kantarıcı 1979a, Eruz 1980, Kantarıcı 1983, Karaöz 1988, Sevgi 1993, Makineci 1999, Kara 2002, Özkan 2003, Çelik 2006, Başaran ve ark. 2007
Kayın	42	27,8	227,3	77,9	Özhan 1977, Kantarıcı 1979a, Eruz 1980, Karaöz 1988, Sevgi 1993, Kara 2002
Maki-Funda vb	33	2,0	424,0	78,3	Özkan 2003, Başaran ve ark. 2007
Alıç	3	22,5	34,4	26,9	Özkan 2003
Gürgen	1	115,1	115,1	115,1	Makineci 1999
Ihlamur	1	113,3	113,3	113,3	Makineci 1999
Kestane	1	85,9	85,9	85,9	Makineci 1999
Sığla	1	126,6	126,6	126,6	Duran 1991
TOPLAM	179	2,0	424,0	80,2	

Tablo 4. İbrelili karışık ormanlarda topraktaki organik karbon miktarları (t/ha)

Ağaç Türü	Profil Sayısı	En Düşük (t/ha)	En Yüksek (t/ha)	Ağırlıklı ort. (t/ha)	Kaynaklar
Sedir-Ardıç	34	13,9	119,4	71,5	Özkan 2003, Başaran ve ark. 2007
Karaçam-Ardıç	20	2,5	106,5	40,5	Özkan 2003, Çelik 2006
Gökmar-Ardıç	12	12,8	180,6	92,8	Özkan 2003
Sedir-Karaçam	8	18,5	82,1	50,8	Özkan 2003
Gökmar-Karaçam	6	28,0	93,2	62,9	Özkan 2003
Karaçam-Kızılçam	6	20,5	147,4	64,5	Çelik 2006
Kızılçam-Ardıç	5	14,9	60,4	38,8	Çelik 2006
Ladin-Gökmar	4	9,0	82,0	42,4	Altun 1995
Sarıçam-Karaçam	2	63,9	82,9	73,4	Çelik 2006
TOPLAM	97	2,5	180,6	62,2	

Tablo 5. İbrelili-yapraklı karışık ormanlarda topraktaki organik karbon miktarları (t/ha)

Ağaç Türü	Profil Sayısı	En Düşük (t/ha)	En Yüksek (t/ha)	Ağırlıklı ort. (t/ha)	Kaynaklar
Karaçam-Meşe	17	10,3	116,1	52,6	Özkan 2003, Çelik 2006
Ladin-Kayın	6	7,0	87,0	40,0	Altun 1995
Meşe-Ardıç	5	22,0	48,6	44,7	Özkan 2003, Çelik 2006
Kızılçam-Maki	3	86,4	110,6	100,8	Duran 1991
Sığla-Meşe-Kızılçam	2	302,4	374,3	338,3	Duran 1991
TOPLAM	33	7,0	374,3	70,8	

Tablo 6. Ağaçlandırma alanlarında topraktaki organik karbon miktarları (t/ha)

Ağaç Türü	Profil Sayısı	En Düşük (t/ha)	En Yüksek (t/ha)	Ağırlıklı ort. (t/ha)	Kaynaklar
Sarıçam	14			108,4	Karaöz 1988
Karaçam	44	9,3	174,6	65,1	Kantarıcı 1979a, Karaöz 1988, Akbin 1994, Kara 2002, Karatepe 2004
Fıstık Çamı	12	11,4	100,5	63,9	Karakan 1996, Kambak 1996
Kızılçam	11	74,4	316,0	149,1	Aydın 1996, Ölçücüoğlu 1997
Sahil Çamı	4	66,2	144,3	106,0	Kantarıcı 1983
TOPLAM	85	9,3	316,0	84,9	

Tablo 7. Yapraklı karışık ormanlarda topraktaki organik karbon miktarları (t/ha)

Ağaç Türü	Profil Sayısı	En Düşük (t/ha)	En Yüksek (t/ha)	Ağırlıklı ort. (t/ha)	Kaynaklar
Meşe-Kayın	13	96,1	234,4	157,3	Özhan 1977, Kantarcı 1979
Sığla-Meşe	1	214,7	214,7	214,7	Duran 1991
TOPLAM	14	96,1	234,4	161,4	

Tablo 8. Türkiye’de orman topraklarındaki organik karbon miktarları (t/ha)

Ağaç Türü	Profil Sayısı	En Düşük (t/ha)	En Yüksek (t/ha)	Ağırlıklı ort. (t/ha)
İbrelî	751	0,8	448,0	77,1
Yapraklı	179	2,0	424,0	80,2
İbrelî Karışık	97	2,5	180,6	62,2
İbrelî-Yapraklı Karışık	33	7,0	374,3	70,8
Yapraklı Karışık	14	96,1	234,4	161,4
İbrelî Ağaçlandırma	85	9,3	316,0	84,9
TOPLAM	1159	0,8	448,0	77,8

YARARLANILAN KAYNAKLAR

kullanımıdır. Karbonun depolandığı alanlarda daha fazla karbon biriktirilmesini sağlamak da diğer bir yaklaşımdır. Böylece karbon depolayan kaynakların, özellikle orman ekosistemlerinin önemi artmakta, yapacak ve yakacak orman ürünlerine talep her geçen gün yükselmektedir. Bu sebeple ülkemiz ormancılığının bu yönde politikalar geliştirmesi gereklidir. Ayrıca amenajman ve silvikültürel uygulamalarda ormanların karbon biriktirme potansiyelleri dikkate alınmalıdır. Orman topraklarında daha fazla karbon bağlanabilmesi için bozuk orman alanlarının verimli hale getirilmesi, tıraşlama kesimlerinden kaçınılması, karışık ormanlar kurulması, silvikültürel müdahalelerin mutedil yapılması ve bu müdahalelerde toprağı korumaya dikkat edilmesi, orman olmayan alanların ağaçlandırılması, toprak erozyonunun engellenmesi, orman arazilerinin yapılaşma, kaçak kesimler ve otlatma ile zarar görmesinin önlenmesi gerekmektedir. Ayrıca ülkemiz orman ekosistemlerinde toprak ve bitkisel kütlede depolanan karbon miktarının ortaya konulabilmesi için araştırmalar yapılmalıdır. Özellikle tüm ülke toprakları için bir “Türkiye Toprak Bilgi Sistemi (TTBS)” oluşturulmasına gereksinim bulunmaktadır. Bu bilgi sisteminde günümüze kadar yapılmış topraklarla ilgili araştırma sonuçları yer almalıdır. Ek olarak ülkemiz topraklarının toprak tekstürü, tipi, derinliği, taşlılığı, pH’sı, organik madde ve besin maddesi durumlarını içeren haritaların da üretilmesi gerekmektedir. Bunun için ICP ormanları olarak adlandırılan ve ülke çapında 16x16 km’lik bir ağ üzerinde sistematik örnekleme dayanan program temel olarak alınabilir (Tolunay 2007). Ülkemiz ormanlarında yaklaşık 800 kadar olan bu örnek alanlardan 10 veya 20 yıllık periyotlarla örnek alınarak, orman topraklarında yıllık ne kadar karbon biriktirildiği, stok değişiminden hesaplanabilecektir. Bu izleme ağı genişletilerek diğer arazi kullanımları (tarım, mera vb) içinde benzer bir tahminde bulunmak mümkündür.

- Akbin (Albayrak), N., 1994. İzmit yöresindeki bazı karaçam ormanlarında toprakların kimyasal özellikleri, İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Orman Mühendisliği Anabilim Dalı, Toprak İlmi ve Ekoloji Programında Hazırlanmış Yüksek Lisans Tezi (X+62 sayfa)
- Altun, L., 1995. Maçka (Trabzon) Orman İşletmesi Ormanüstü serisinde orman yetiştirme ortamı birimlerinin ayrılması ve haritalanması üzerine araştırmalar, K.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon
- Aydın, V., 1996. Elmalı Baraj Havzasında Kızılcım (*Pinus brutia* Ten) ormanının toprak özellikleri, İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Orman Mühendisliği Anabilim Dalı, Toprak İlmi ve Ekoloji Programında Hazırlanmış Yüksek Lisans Tezi (VI+90 sayfa)
- Başaran, M. A., Başaran, S., Kaçar, S., Baş, N., Tolunay, D., Makineci, E., Kavgacı, A. T., Deniz, İ.G. 2008. Sedir Araştırma Ormanında aktüel durumun coğrafi bilgi sistemi tabanlı sayısal haritalarla ortaya konulması, T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı tarafından desteklenen (ARA 6) 19.6302/2001–2007 no.lu proje
- Berg, B., Laskowski, R., 2005. Origin and Structure of Secondary Organic Matter and Sequestration of C and N, in: Litter Decomposition: a Guide to Carbon and Nutrient Turnover, Volume 38 (Advances in Ecological Research), ed: H. Caswell, Academic Press
- Botkin, D., Keller, E., 1995. Environmental Science Earth As a Living Planet, John Wiley&Sons, Inc.
- Canadell, J., Le Quéré, C., Raupacha, M., Fielde, C., Buitenhuis, E., Ciais, F., Conway, T., Gillett, N., Houghton, R., Marland, G. 2007. Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks, in: Proceedings

- of the National Academy of Sciences <http://www.pnas.org/cgi/reprint/0702737104v1.pdf> (erişim tarihi 21.01.2008)
- Çelik, N., 2006. Sündiken dağları kütesinin yetişme ortamı özellikleri ve sınıflandırılması, İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Orman Mühendisliği Anabilim Dalı, Toprak İlimi ve Ekoloji Programında Hazırlanmış Doktora Tezi (XII+310 Sayfa)
- Çepel, N., Dündar, M., Günel, A., 1977. Türkiye'nin önemli yetişme bölgelerinde saf sarıçam ormanlarının gelişimi ile bazı edafik ve fizyografik etmenler arasındaki ilişkiler, TÜBİTAK, Tarım ve Ormancılık Araştırma Gubu, Proje No: TOAG 154, Tübitak Yayınları No: 354, TOAG Seri No: 65, Ankara.
- ÇOB (Çevre ve Orman Bakanlığı AR-GE Daire Başkanlığı) 2006. Arazi Kullanımı, Arazi Kullanım Değişikliği ve Ormancılık (LULUCF) Çalışma Grubu Raporu, Ankara
- Dixon, R.K., Brown, S., Houghton, R.A., Solomon, A.M., Trexler, M.C., Wisniewski, J., 1994. Carbon pools and fluxes of global forest ecosystems, *Science* 263:185-190
- Duran, A., 1991. Reşadiye (Datça) Yarımadası'nda ofiolit anakayasından oluşmuş toprakların özelliklerinin yeryüzü şekli ve bitki örtüsüne göre değişimi üzerine incelemeler, İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Orman Mühendisliği Anabilim Dalı, Toprak İlimi ve Ekoloji Programında Hazırlanmış Yüksek Lisans Tezi
- Eruz, E., 1980. Belgrad ormanı'ndaki meşe ve kayın ekosistemlerinin bazı önemli kimyasal ve fiziksel toprak özelliklerine ilişkin araştırmalar, İ.Ü. Yay No:2641 Of Yay No:280 Matbaa Teknisyenleri Basımevi İstanbul.
- Eruz, E., 1984. Balıkesir Orman Başmüdürlüğü bölgesindeki saf karaçam meşcerelerinin boy gelişimi ile bazı edafik ve fizyografik özellikler arasındaki ilişkiler, İ.Ü. Yay No:3244, Of Yay No:368 Matbaa Teknisyenleri Basımevi İstanbul.
- Güner, Ş. T., 2006. Türkmen Dağı (Eskişehir, Kütahya) Sarıçam (*Pinus sylvestris* ssp. *hamata*) ormanlarının yükseltiyeye bağlı büyüme beslenme ilişkilerinin belirlenmesi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyoloji Anabilim Dalında Hazırlanmış Doktora Tezi (XXV+298 Sayfa)
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2003. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Hayama, Japan
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007. Climate Change 2007: Synthesis Report
- Jandl, R., Lindner, M., Vesterdal, L., Bauwens, B., Baritz, R., Hagedorn, F., Johnson, D. W., Minkinen, K., Byrne, K.A., 2007. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration?, *Geoderma* 137:253-268
- Janzen, H.H., 2004. Carbon cycling in earth systems-a soil science perspective, *Agriculture, Ecosystems and Environment* 104:399-417
- Joyce, L.A., Birdsey, R., 2000. The impact of climate change on America's forests: a technical document supporting the 2000 USDA Forest Service RPA Assessment. USDA Forest Service No. RMRS-GTR 59, 134 pp
- Kalay, Z., 1989. Trabzon Orman Bölge Müdürlüğü mntikasında saf doğu ladini (dorukağaç) (*Picea orientalis* (L.) Link) büklerinin gelişimi ile bazı toprak özelliklerinin ve fizyografik etmenler arasındaki ilişkilerin denel olarak araştırılması, K.T.Ü. Orman Fakültesi Doçentlik Tezi (X+151 Sayfa)
- Kambak, A., 1996. Elmalı Baraj Havzasında fıstık çamı (*Pinus pinea* L) ormanlarının toprak özellikleri, İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Orman Mühendisliği Anabilim Dalı, Toprak İlimi ve Ekoloji Programında Hazırlanmış Yüksek Lisans Tezi (VI+64 Sayfa)
- Kantarci, M.D., 1974. Trakya'da bir orman köyü çevresinde, ormanın mera ve tarlaya dönüştürülmesi ile orman toprağının bazı özelliklerinde meydana gelen değişiklikler, İ.Ü. Orman Fakültesi Dergisi Seri A, Cilt 14, Sayı 1:191-217.
- Kantarci, M.D., 1979a. Ilıman iklim koşullarında silikat anataşından oluşan toprakların yıkanma ve birikme horizonlarının analitik olarak incelenmesi, İ.Ü. Orman Fakültesi Dergisi Seri A, Cilt 29, Sayı 1:14-53
- Kantarci, M.D., 1979b. Aladağ Kütesinin (Bolu) kuzey aklanındaki uludağ göknarı ormanlarında yükselti-iklim kuşaklarına göre bazı ölü örtü ve toprak özelliklerinin analitik olarak araştırılması, İ.Ü. Yay.No.2634, Orman Fakültesi Yay.No.274, İstanbul
- Kantarci, M.D., 1983. Kerpe Tur-71/521 ağaçlandırma alanında uygulanan arazi hazırlığı ve toprak işleme yöntemlerinin toprak özellikleri ve sahil çamı fidanlarının gelişimi üzerine etkileri, İ.Ü. Orman Fakültesi Dergisi Seri A, Cilt 33, Sayı 2:104-140
- Kantarci, M. D., 2000. Toprak İlimi (2. Baskı), İ.Ü. Yayın No. 4261, Orman Fakültesi Yayın No. 462, Çantay Basımevi, İstanbul
- Kara, Ö., 2002. Kuzey Trakya dağlık yetişme ortamı bölgesinde kayın, meşe, karaçam ormanlarındaki toprak mikrofunguslarının mevsimsel değişimi, İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Orman Mühendisliği Anabilim Dalı, Toprak İlimi ve Ekoloji Programında Hazırlanmış Doktora Tezi (XII+140 sayfa)
- Karakan, B., 1996. Gelibolu Yarımadası'nda fıstık çamı (*Pinus pinea* L.) ağaçlandırma alanlarında toprak özellikleri ve boylanmaya etkisi, İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Orman Mühendisliği Anabilim Dalı, Toprak İlimi ve Ekoloji Programında Hazırlanmış Yüksek Lisans Tezi (VII+69 sayfa)
- Karaöz, M.Ö., 1988. Belgrad Ormanı'nda bazı iğne yapraklı ve geniş yapraklı orman ekosistemlerinin önemli edafik özellikleri ile bitkisel kütle karakteristikleri bakımından

- karşılaştırılması, İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Orman Mühendisliği Anabilim Dalı, Toprak İlmi ve Ekoloji Programında Hazırlanmış Doktora Tezi (VII+203 Sayfa)
- Karatepe, Y., 2004. Gölcük (Isparta)'te karaçam (*Pinus nigra* Arn. ssp. *pallasiana* (Lamb) Holmboe) meşcerelerinin topraklarındaki toplam azot ve organik karbon ile ölü örtülerindeki toplam azot ve organik madde miktarlarının araştırılması, SDÜ Orman Fakültesi Dergisi, Seri A, Sayı 2:1-16
- Lal, R., 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security, *Science* 304:1623-1627
- Lal, R., 2005. Forest soils and carbon sequestration, *Forest Ecology and Management* 220:242-258
- Makineci, E., 1999. İ.Ü. Orman Fakültesi Araştırma Ormanındaki baltalıkların koruya dönüştürülmesi işlemlerinin ölü örtü ve topraktaki azot değişimine etkileri, İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Orman Mühendisliği Anabilim Dalı, Toprak İlmi ve Ekoloji Programında Hazırlanmış Doktora Tezi (XXIV+213 Sayfa)
- Morgan, M.G., Pitelka, L.F., Shevliakova, E., 2001. Elicitation of expert judgments of climate change impacts on forest ecosystems, *Climatic Change* 49: 279-307
- Ölçücüoğlu, L., 1997. Gelibolu Yarımadası'nda Kızılcıçam (*Pinus brutia* Ten.) ağaçlandırma alanlarında toprak özellikleri ve boylanmaya etkisi, İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Orman Mühendisliği Anabilim Dalı, Toprak İlmi ve Ekoloji Programında Hazırlanmış Yüksek Lisans Tezi (V+58 sayfa)
- Özhan S., 1977. Belgrad Ormanı Ortadere Yağış Havzasında ölü örtünün hidrolojik bakımdan önemli özelliklerinin bazı yöresel etkenlere göre değişimi, İ.Ü. Yayın No. 2330 Orman Fakültesi Yayın No 235 Çelikkilt Matbaası, İstanbul
- Özkan, K., 2003. Beyşehir Gölü Havzasının yetişme ortamı özellikleri ve sınıflandırılması, İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Toprak İlmi ve Ekoloji Programında Hazırlanmış Doktora Tezi (XVI+189 sayfa)
- Parton, W.J., Schimel, D.S., Cole, C.V., Ojima, D., 1987. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in the Great Plains grasslands, *Soil Science Society of America Journal* 51:1173-117
- Schachtschabel, P., Blume, H.P., Brümmer, G., Hartge, K.H., Schwertmann, U. 2007. Scheffer/Schachtschabel Toprak Bilimi, yeniden ele alınarak hazırlanmış 12. baskı, Çeviri: H. Özbek, Z. Kaya, M. Gök, H. Kaptan, Ç.Ü. Ziraat Fakültesi Yayın No:73, Ders Kitapları yayın No: A-16, Adana
- Schulze, E.D., Lloyd, J., Kelliher, F.M., Wirth, C., Rebmann, C., Lühker, B., Mund, M., Knohl, A., Milyukova, I.M., Schulze, W., Ziegler, W., Varlağın, A., Sogachev, A.F., Valentini, R., Dore, S., Grigoriev, S., Kolle, O., Panfyorov, M.I., Tchebakova, N., Vygodskaya, N., 1999. Productivity of forests in the Eurosiberian boreal region and their potential to act as a carbon sink - a synthesis, *Global Change Biology* 5:703-722.
- Sevgi, O., 1993. Demirköy granit arazisinde orman altında ve ormandan açılmış alanlarda toprak özellikleri, İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Orman Mühendisliği Anabilim Dalı, Toprak İlmi ve Ekoloji Programında Hazırlanmış Yüksek Lisans Tezi (VIII+83 sayfa)
- Sevgi, O., 2003. Bayramiç İşletmesinde (Kaz Dağları) Karaçam'ın (*Pinus nigra* Arnold.) yükseltiye göre beslenme büyüme ilişkileri, İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Orman Mühendisliği Anabilim Dalı, Toprak İlmi ve Ekoloji Programında Hazırlanmış Doktora Tezi (XV+221 sayfa)
- Tolunay, D., 1992. Aladağ (Bolu) Kartalkaya bölgesinde büyük saha siperinde yetiştirilmiş sarıçam meşcerelerinin toprak özellikleri üzerine araştırmalar, İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Orman Mühendisliği Anabilim Dalı, Toprak İlmi ve Ekoloji Programında Hazırlanmış Yüksek Lisans Tezi (I+142 Sayfa)
- Tolunay, D., 1997. Aladağ'da (Bolu) sıklık çağındaki Sarıçam (*Pinus sylvestris* L.) meşcerelerinde bakımların madde dolaşımına etkileri, İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Orman Mühendisliği Anabilim Dalı, Toprak İlmi ve Ekoloji Programında Hazırlanmış Doktora Tezi (IX+213 Sayfa)
- Tolunay, D., 1999. Aladağ (Bolu) Kartalkaya Bölgesinde büyümsaha siperinde yetiştirilmiş sarıçam meşcerelerinin ölü örtü ve toprak özellikleri üzerine araştırmalar, İ.Ü. Orman Fakültesi Dergisi Seri A, Cilt 49, Sayı 2:145-166
- Tolunay, D., 2002. Aladağ'da (Bolu) sıklık çağındaki sarıçam (*Pinus sylvestris* L.) meşcerelerinde bakımların madde dolaşımına etkileri, İ.Ü. Orman Fakültesi Dergisi Seri A, Cilt 53, Sayı 1: 47-73
- Tolunay, D., 2004. Aladağ'da (Bolu) genç sarıçam meşcerelerinde bakım kesimlerinin ölü örtü ve toprak özelliklerine etkisinin belirlenmesi üzerine araştırmalar (10. yıl sonuçları), İstanbul Üniversitesi Araştırma Fonu Tarafından Desteklenen Proje, No. 1606/30042001
- Tolunay, D., 2007. Toprak fonksiyonları ve bu fonksiyonlar üzerindeki tehditler, Ölçü Mühendislikte, Mimarlıkta ve Planlamada, Eylül, 80-88
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) 2008. National Inventory Submissions 2007. http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/3929.php (erişim tarihi 21.01.2008)
- Zou, X. M., Ruan, H.H., Fu, Y., Yang, X.D., Sha, L.Q. 2005. Estimating soil labile organic carbon and potential turnover rates using a sequential fumigation-incubation incubation procedure. *Soil Biology & Biochemistry* 37:1923-1928