

Karacabey subasar orman ekosistemlerinde ormancılık faaliyetlerinin toprak CO₂ ve CH₄ salınımına etkisi

Impact of forest management activities on soil fluxes of CO₂ and CH₄ in Karacabey forested wetland ecosystems

Temel SARIYILDIZ^{1*} 

¹Bursa Teknik Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Mühendisliği Bölümü, Toprak İlimi ve Ekoloji Anabilim Dalı, Bursa, Türkiye

Eser Bilgisi / Article Info

Araştırma makalesi / Research article
DOI: 10.17474/artvinofd.1438751

Sorumlu yazar / Corresponding author
Temel SARIYILDIZ
e-mail: temel.sariyildiz@btu.edu.tr

Geliş tarihi / Received

17.02.2024

Düzeltilme tarihi / Received in revised form

29.02.2024

Kabul Tarihi / Accepted

29.04.2024

Elektronik erişim / Online available

15.05.2024

Anahtar kelimeler:

Toprak solunumu
Fraxinus angustifolia
Alnus glutinosa
Toprak sıkışması
Metan

Keywords:

Soil respiration
Fraxinus angustifolia
Alnus glutinosa
Soil compaction
Methane

Özet

Karacabey subasar ormanlarında, ormancılık faaliyetlerinin toprak karbondioksit (CO₂) ve metan (CH₄) gazı salınımına etkisi, mayıs ve eylül ayları arasında gerçekleştirilen ölçümlerle belirlenmeye çalışılmıştır. Toprak CO₂ ve CH₄ salınım miktarı ve salınımına etkisi olan temel faktörleri ortaya koymak amaçlı, arazi çalışmaları, ormancılık faaliyetlerinin yapıldığı ve yapılmadığı doğal kızılgağaç (*Alnus glutinosa* L. Gaertn.) ve dişbudak (*Fraxinus angustifolia* Vahl.) meşcerelerinin c ve d gelişme çağlarında gerçekleştirilmiştir. Toprak CO₂ salınımı statik (soda kireç) yöntem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ek olarak, çalışmanın başında (mayıs) ve sonunda (eylül) dinamik yöntemle (LI-8100A, LI-COR ölçüm cihazıyla) CO₂ salınım ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Toprak CH₄ salınımı ise statik yöntemle (closed static chamber method) ölçülmüştür. Çalışma alanlarının meşcere ve toprak özellikleri yanında toprak penetrasyon direnci (TPD) taşınabilir elektronik penetrometre yardımıyla belirlenmiştir. Ormancılık faaliyetlerinin gerçekleştiği topraklarda belirlenen yüksek hacim ağırlığı ve TPD değerleri, alanların sıkışmaya maruz kaldığını göstermiştir. Toprak CO₂ salınımı ormancılık faaliyetlerinin olduğu alanlarda daha yüksek bulunmuştur. Doğal alanlarda, CO₂ salınımı dişbudak için 1.298 ile 1.723 g C m⁻² g⁻¹, kızılgağaç için 1.011 ile 1.368 g C m⁻² g⁻¹, arasında değişirken, üretim alanlarında bu değerler dişbudak için 1.658 ile 2.687 g C m⁻² g⁻¹, kızılgağaç için 1.112 ile 1.987 g C m⁻² g⁻¹, arasında belirlenmiştir. Toprak CH₄ salınımı, tezat olarak, doğal alanlarda daha yüksek tespit edilmiştir. Doğal alanlarda, CH₄ salınım değerleri dişbudak için 0.198 ile 0.726 mg C m⁻² h⁻¹, kızılgağaç için 0.124 ile 0.511 mg C m⁻² h⁻¹, arasında değişirken, üretim alanlarında bu değerler dişbudak için 0.054 ile 0.278 mg C m⁻² h⁻¹, kızılgağaç için 0.022 ile 0.197 mg C m⁻² h⁻¹, arasında belirlenmiştir.

Abstract

Impacts of forest management activities on soil carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄) fluxes were studied from May to September in Karacabey forested wetlands. To understand the main factors that affect CO₂ and CH₄ fluxes, a field study was carried out in both managed and natural stands of alder (*Alnus glutinosa* L. Gaertn.) and ash tree (*Fraxinus angustifolia* Vahl.) stands at c and d development stages. The static (soda lime) and dynamic (LI-8100A, LI-COR) methods were used to measure CO₂ fluxes. The surface flux of CH₄ was measured by using closed static chamber method. Stand characteristics and soil properties were also determined. A portable electronic penetrometer was used to measure soil penetrometer resistance (SPR) in the study sites. The results showed that the soils in the managed sites were compacted, as indicated by higher bulk density and SPR. Soil CO₂ flux was higher in the managed stands. In natural stands, CO₂ fluxes ranged from 1.298 to 1.723 g C m⁻² d⁻¹ for ash tree, and from 1.011 to 1.368 g C m⁻² d⁻¹ for alder, while in the managed stands, they ranged from 1.658 to 2.687 g C m⁻² d⁻¹ for ash tree, and from 1.112 to 1.987 g C m⁻² d⁻¹ for alder. In contrast to CO₂, soil CH₄ flux was lower in the managed stands. In natural stands, CH₄ fluxes varied from 0.198 to 0.726 mg C m⁻² h⁻¹ for ash tree, and from 0.124 to 0.511 mg C m⁻² h⁻¹ for alder, while in the managed stands, they varied from 0.054 to 0.278 mg C m⁻² h⁻¹ for ash tree, and from 0.022 to 0.197 mg C m⁻² h⁻¹ for alder.

GİRİŞ

Karasal ekosistemlerin %5 ile 8'ini kapladığı tahmin edilen sulak alanların, yaklaşık olarak %60'ının subasar ormanlardan oluştuğu bildirilmiştir (Calhoun 1999, UNCCD 2017). Subasar ormanlar, biyolojik çeşitlilik, hidrolojik döngü, ekoturizm gibi insanlığa sunduğu ekosistem hizmetleri ve değerleri yanında, son yıllarda subasar orman topraklarının potansiyel sera gazı kaynağı olduğu (özellikle CO₂ ve CH₄ gazı) kabul edilmektedir (Gutenberg ve ark. 2019). Bununla beraber, özellikle

antropojenik faaliyetler, subasar orman ekosistemlerinde, sera gazlarının üretimini düzenleyen substratları ve çevresel şartları değiştirmek suretiyle, subasar orman topraklarından salınan sera gazlarının miktarlarını ve salınım şeklini etkileyebilmektedir (Mwanake ve ark. 2023).

Yukarıda sayılan özellikler yanında, özellikle Amerika (McLaughlin ve ark. 2000) ve Kanada'da (Smith 2007), subasar ormanların ormancılık faaliyetleri için önemli bir yapacak odun kaynağı olduğu ifade edilmektedir. Ancak subasar

ormanların, odun üretimi için yönetilmesi zor bir iştir. Çünkü üretim faaliyetlerinin subasar orman ekosistemlerinin fonksiyonlarını değiştirebilme ve subasar orman ekosisteminde ciddi değişikliklere neden olabilme potansiyeli bulunmaktadır. Ormancılık faaliyetlerinin (örneğin traşlama, seçme işletmesi, aralama ve bakım vb.) subasar orman ekosistemlerini birçok yönden etkileyebildiği rapor edilmiştir. Shepard (1994) bu etkilenmeyi, transpirasyonun ve intersepsiyonun azalmasıyla taban suyunun yükselmesi, ağır ekipmanların kullanılması nedeniyle toprağın bozulması ve sıkışması, yol yapımı, çukur oluşumu ve drenajdan kaynaklı hidrolojinin değişmesi şeklinde olabileceğini bildirmiştir.

Orman ekosistemlerinde ağır makinalarının kullanılarak yapılan ormancılık faaliyetlerinin toprağın fiziksel özellikleri üzerindeki olumsuz etkisi birçok araştırmacı tarafından ortaya konulmuştur (Nawaz ve ark. 2013, Bolat ve ark. 2015, Cambi ve ark. 2015, Baek ve ark. 2022, Gibson ve ark. 2023). Ağır makinelerin toprağın fiziksel özelliklerine doğrudan etkisi toprak sıkışması olup, toprak sıkışmasının şiddetinin başlangıçta toprak özellikleri, orman tipi ve toprak ana materyaline göre farklılık gösterebileceği ifade edilmektedir (Williamson ve Neilsen 2000). Birçok çalışmada, toprak sıkışmasıyla, toprak taneciklerinin sıkışarak aralarındaki gözenekliliğin azalmasına ve toprağın hacim ağırlığının artmasına neden olduğu bildirilmiştir (Bolat ve ark. 2015, Cambi ve ark. 2015, Gürsoy, 2021, Wang ve ark. 2022). Bunlara ek olarak, toprakların sıkışmasıyla toprak havalanmasının, infiltrasyon oranı ve hava ile dolmuş boşluklarının azalmasının, toprakta karbondioksit (CO₂) ve metan (CH₄) salınımıyla ilgili biyolojik süreçleri etkileyebileceği ve ormancılık sektörü için önemli olan sera gazı emisyonlarını azaltma potansiyelini düşürebileceği ifade edilmektedir (Nawaz ve ark. 2013).

Çevresel değişkenlerin ve bozulmaların, orman toprağından saliverilen sera gazı emisyon miktarlarına ve havuzlarına etkisini değerlendiren çalışmaların çoğunluğu, karasal orman ekosistemlerinde gerçekleştirilmiş olup (Cambi ve ark. 2015), bu çalışmalarda iklim değişikliğindeki öneminden dolayı çoğunlukla CO₂'ye odaklanılmıştır (Tüfekçioğlu ve Küçük 2004, Akburak 2008, Sakin ve ark. 2016). Bu nedenle orman ekosistemlerinin CH₄ salınım miktarına yönelik çok az veri mevcuttur. Doğal subasar orman topraklarından CO₂ ve CH₄ salınımlarını ortaya koyan birkaç çalışma mevcut olmasına rağmen (Bubier ve ark. 2003, Gutenberg ve ark. 2019), toprak sıkışmasının subasar orman topraklarında CO₂ ve CH₄ salınım miktarına yönelik çalışmaların sayısı sınırlı olup, bilgimiz dahilinde konularıyla ilgili Türkiye subasar ormanlarından herhangi bir çalışma mevcut değildir.

Bu çalışmada, (1) Karacabey subasar ormanlarında, ormancılık faaliyetlerinin (üretim ve silvikültürel işlemler) topraktan CO₂ ve CH₄ salınımına etkisini, subasar ortamın en baskın ağaç türleri arasında yer alan dişbudak (*Fraxinus angustifolia* Vahl.) ve kızılğaç (*Alnus glutinosa* L. Gaertn.) meşcerelerinde ortaya koyulması, (2) topraktan CO₂ ve CH₄ salınımına mevsimsel etkinin belirlenmesi, (3) farklılıkların toprak özellikleri ve toprak penetrasyon direnci ile ilişkiye getirilmesi amaçlanmıştır.

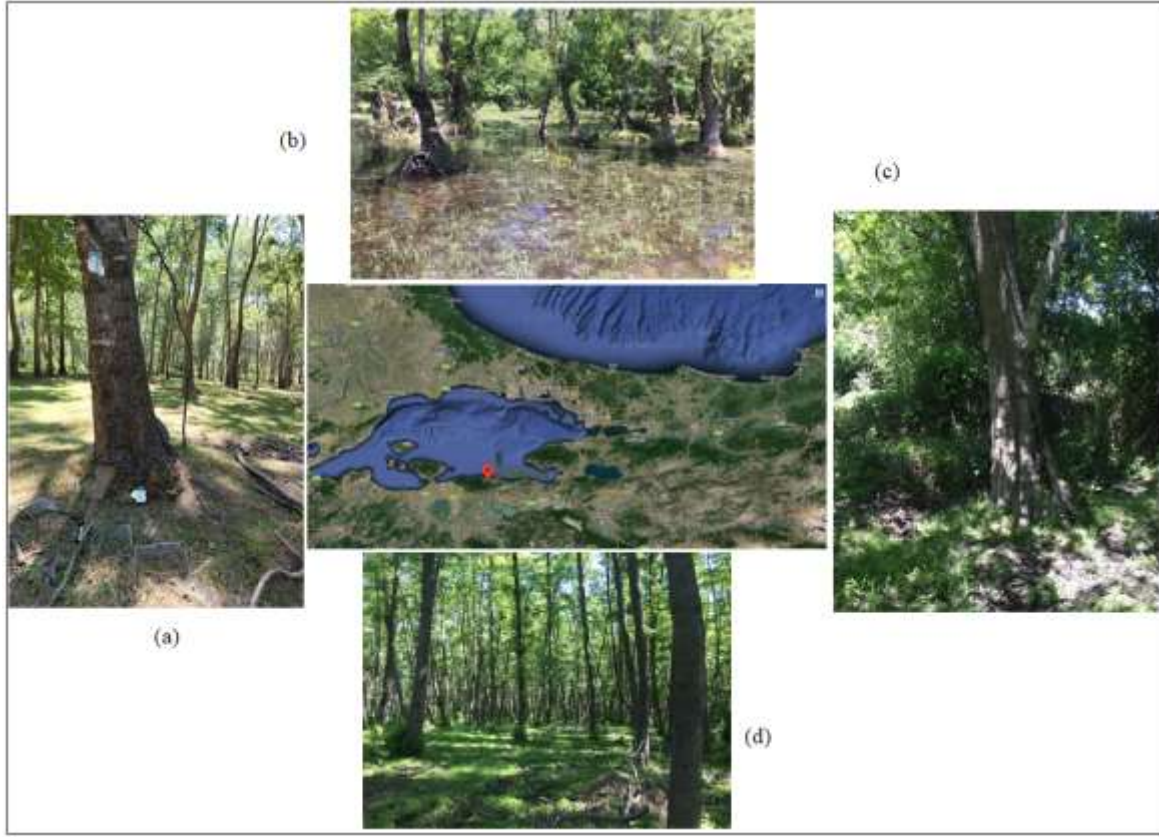
MATERYAL VE METOT

Çalışma Alanının Tanıtımı

Çalışma alanı olarak Bursa, Karacabey kıyasal subasar orman ekosistemleri seçilmiştir (Şekil 1). Karacabey subasar ormanları yaklaşık 3800 hektar olup (Akay ve ark. 2017), bünyesinde ormanlık alanlar (950 ha), kumul alanlar (623 ha), bataklık ve sazlıklar (532 ha), göller (760 ha), otlak alanlar (390 ha) ve tarım alanları (545 ha) yer almaktadır (Tarım ve Orman Bakanlığı 2. Bölge Müdürlüğü 2020). Türkiye Cumhuriyeti Tarım ve Orman Bakanlığı'na göre bu ormanlık alanlar, tropikal bölgesindeki Mangrove ormanlara benzer özellikler gösteren subasar ormanlar olarak tanımlanmaktadır. Subasar ormanlarda baskın ağaç türleri saf ve karışık dişbudak (*Fraxinus angustifolia* Vahl.) ve kızılğaç (*Alnus glutinosa* L. Gaertn.) olmak üzere karışıma katılan farklı meşe (*Quercus robur*, *Quercus cerris*, *Quercus pubescens*) türleri ile çınar (*Platanus orientalis* L.) ve ak kavaktır (*Populus alba*) (Keçeli ve Ursavaş 2019).

Karacabey subasar ormanının bulunduğu bölgede farklı toprak tiplerine (kahverengi orman toprakları, alüvyal, kolüvyal, kıyasal alüvyal ve rendzina) rastlanmaktadır (Sarıyıldız ve Tanı 2023). Çalışmanın gerçekleştirildiği alanlarda hâkim toprak tipi alüvyal topraktır. Bölgede hâkim olan iklim tipi, yarı-nemli iklimdir. 2007-2023 yılları arasını içeren Karacabey Meteoroloji İstasyonunun 16 yıllık meteorolojik verilerine göre ortalama sıcaklık 15.5 °C ve yıllık yağış ise 719 mm'dir (MGM 2023).

Genel olarak, Karacabey subasar ormanları koruma statüsünde olup, doğal dişbudak ve kızılğaç ormanlarında üretim faaliyetlerine izin verilmemektedir. Bununla beraber, Karacabey Orman İşletme Müdürlüğü tarafından kızılğaç meşcerelerinde bakım ve üretim amaçlı kesim faaliyetleri gerçekleştirilmektedir. Bölgede kızılğaç meşcerelerine yakın mesafede (yaklaşık 200 m. mesafede) birkaç hektarda olsa şahsa ait üretim amaçlı dişbudak meşceresi bulunmaktadır.



Şekil 1. Karacabey subasar ormanlarının konumu. (a) üretim faaliyeti yapılan dişbudak meşceresi, (b) doğal dişbudak meşceresi, (c) doğal kızılğaç meşceresi ve (d) üretim faaliyeti yapılan kızılğaç meşceresi

Subasar ormanlarda üretim faaliyetlerinin toprak CO₂ ve CH₄ salınımına etkisi bu üretim yapılan (ÜY) ve yapılmayan (doğal) saf dişbudak ve kızılğaç meşcerelerinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Dişbudak ve kızılğaç meşcerelerinde 20 m x 20 m genişliğinde (400 m²) toplam 24 adet örneklem alanı [2 ağaç türü (dişbudak ve kızılğaç) x 2 meşcere gelişme çağı (c ve d) x 2 ortam (doğal ve ÜY) x 3 tekrar örneklem alan = 24 örneklem alanı] alınmıştır. Her bir ağaç türü için alınan tekrar örneklem alanları birbirinden yaklaşık 300 metre uzaklıkta alınmıştır.

Meşcere Özelliklerinin Belirlenmesi

Meşcere özellikleri her bir örneklem alanında belirlenmiştir. Her bir örneklem alanında, normal gelişim gösteren üç ağacın göğüs yüksekliğindeki (d_{1.30} cm) çapı ve boyu (m) ölçülerek, meşcere tipine göre ortalama çap ve boy belirlenmiştir. Ağaç boylarının ölçülmesinde Blume-Leiss, göğüs yüksekliğindeki (d_{1.30} cm) çap ölçümünde çap ölçer kullanılmıştır. Ağaçların yaşları yine göğüs yüksekliğinden (d_{1.30} cm) artım burgusu yardımı ile belirlenmiştir. Ortalama meşcere kapallığını yorumlamada, çalışma alanına ait meşcere haritasından,

örnekleme alanlarında yapılan ölçüm ve sahadaki gözlemlerden yararlanarak belirlenmiştir.

Toprak Örnekleme ve Analizi

Örnekleme alanlarının topraklarında bazı fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirlemek için, her bir örneklem alanında, iki farklı toprak derinliğinden (0-30 cm ve >30 cm) doğal yapısı bozulmuş ve bozulmamış toprak örnekleri alınmıştır. Doğal yapısı bozulmamış toprak örneği çelik silindir yardımıyla alınmıştır. Silindirler istenilen derinliğe kadar çakıldıktan sonra kenarları ve tabanı keskin bir bıçakla fazlalıklardan temizlenmiş ve polietilen torbalara yerleştirilmiştir. Laboratuvara getirilen doğal yapısı bozulmamış toprak örneklerinin hacim ağırlığı, kurutma fırınında 105 °C'de 24 saat kurutulup hassas terazide tartıldıktan sonra elde edilen fırın kuru ağırlıkları silindir örneğinin hacmine oranı ile (g/cm³) hesaplanmıştır (Blake ve Hartge 1986). Hacim ağırlığının belirlenmesi amacıyla aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır.

$$Ha = Tf / Vt$$

Ha: Hacim ağırlığı (g/cm³), Tf: Toprak (fırın kuru) ağırlığı (g), Vt: silindiri hacmi (cm³).

Belirlenen hacim ağırlığı değerleri kullanılarak toprakların porozitesi aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır.

$$f = [1 - (Ha / \bar{O}_z)] \times 100$$

f: Porozite (%) Ha: Hacim ağırlığı (g/cm³), $\bar{O}_z$: Katı kısım yoğunluğu (özellik ağırlık) (2.65 g/cm³).

Araziden laboratuvara getirilen doğal yapısı bozulmuş toprak örnekleri ise kurutma kâğıtları üzerine serilerek hava kurusu hale getirilmiş, porselen havanlarda öğütülmüş ve sonrasında 2 mm'lik elekten geçirilerek analize hazır hale getirilmiştir. Sonrasında, toprak örneklerinin, yüzde nem, pH, elektriksel iletkenlik (EC), organik madde ve tekstür (kum, toz, kil) miktarları belirlenmiştir.

Toprakların yaş ve fırın kurusu (105 °C) ağırlıkları farkından yüzde nem miktarı belirlenmiştir Toprak reaksiyonu (pH), hava kurusu hale gelen toprak örneklerinin 1/2.5 oranında saf su + toprak karışımı ile pH metre kullanılarak çözelti asitliği olarak belirlenmiştir (Thomas 1996). Toprakların elektriksel iletkenliğini belirlemek için hava kurusu toprak örnekleri 1/5 oranında saf su karıştırılarak elektriksel iletkenlik aleti kullanılarak bir prob yardımıyla okumalar yapılmıştır (Rhoades 1996). Toprağın organik madde (OM) içeriği, ateşte kayıp yöntemine göre belirlenmiştir (Margesin ve Schinner 2005). Yöntem fırın kurusu toprak örneğinin 550 °C'de 4 saat süreyle yakılması esasına dayanmaktadır. Toprağın OM içeriği başlangıçtaki ağırlık ile yakma sonrası ağırlık arasındaki kütle farkının hesaplanmasıyla bulunmuştur. Toprak örneklerinin tekstürü (kum, toz, kil) Bouyoucos hidrometre yöntemi'ne göre yapılmıştır (Bouyoucos 1962).

Toprakların Penetrasyon Direncinin Belirlenmesi

Toprakların penetrasyon direncini (TPD) belirlemek amacıyla, taşınabilir elektronik penetrometre (Field Scout SC 900) kullanılmıştır (Şekil 2). Her bir örnekleme alanında, 0-45 cm toprak derinliğinde, SPR değerleri 2.5 cm aralıklarla üç tekrarlı olarak ölçülmüştür. Penetrometreye ½ lik konik uç takılarak, yavaşça toprağa doğru itilmiştir. Maksimum basınç okumaları toprak yüzeyinden 45 cm'ye kadar otomatik olarak kaydedilmiş,

daha sonra bu veriler, belirli sıkışma derinliklerini belirlemek için grafiklere aktarılmıştır.



Şekil 2. Toprakların penetrasyon direnci (TPD) arazide, ormancılık faaliyetlerinin yapıldığı dışbudak (üst sol) ve kızılbaş (alt sol) meşcereleri ile doğal dışbudak (üst sağ) ve kızılbaş (alt sağ) meşcerelerinde ölçülmüştür

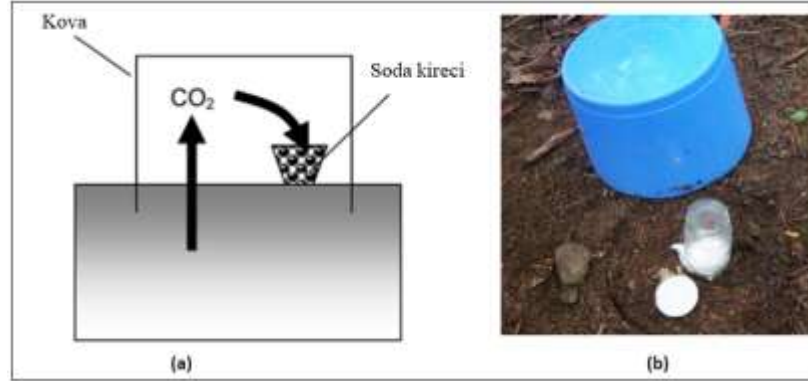
Toprak CO₂ Salınımının Belirlenmesi

Toprak solunumunu belirlemek için iki ana ölçüm yaklaşımı (statik/sabit ve dinamik yöntemler) kullanılmıştır: Bunlar: Soda kireç yöntemi ve IRGA (kızılötesi gaz analizörü) cihazı (LI-8100A, LI-COR) yardımıyla ölçümler gerçekleştirilmiştir.

Statik/Sabit Metot

Toprak solunumu soda kireç yöntemi kullanılarak (Raich ve ark. 1990, Raich ve Tüfekçioğlu 2000) her bir örnekleme alanında mayıs-haziran-temmuz-ağustos ve eylül aylarında, her bir ayın başında, ortasında ve sonunda olmak üzere ayda 3 kez ölçülmüştür. Kullanılan bu yöntemde, ortalama 60-gram soda kireci alınarak daha önce darası belirlenmiş kavanozlara konularak içindeki nem içeriğini bertaraf etmek için 105 °C'deki kurutma fırınında bir gece bekletilmiştir. Sonra her bir kavanoz tartılmış ve ağırlıkları not edilerek numaralandırılmıştır. Daha sonra bu kavanozlar araziye götürülerek deneme alanlarına ağız açık şekilde tek tek bırakılarak yüzey alanı belli olan plastik kovalarla üzerleri kapatılmıştır. Güneş

ısınmasından etkileşimini aza indirmek için kovaların üzerine alüminyum folyo konulmuş ve araziye konulma saatleri not edilmiştir (Şekil 3). Kontrol amaçlı olarak 6



Şekil 3. Topraktan saliverilen CO₂ miktarının, kavanoz içindeki soda-kireci tarafından yakalanması (a) esasına dayanan yöntem arazide dışbudak ve kızılğaç doğal ve üretim yapılan meşcerelerinde (b) ölçülmüştür

adet kavanozun ağızları 1 dakika açık şekilde bekletilmiş ve tekrardan ağızları kapatılmıştır. Bir gün sonra ise arazideki kavanozlar alma saatleri not edilerek ağızları sıkı şekilde kapatılarak laboratuvara getirilmiştir. Alınan kavanozlar laboratuvarda 105 °C' de kurutma fırınında bir gece bekletildikten sonra tartılmış ve ağırlık kazanımları hesaplanmıştır. Daha sonra kontrol kavanozlarındaki ağırlık kazanımları da dikkate alınmak suretiyle aşağıdaki formülde gerekli işlemler yapılarak o alandaki günlük toprak solunumu belirlenmiştir.

$$TS \text{ (g C/m}^2\text{/gün)} = [(AKA - SKA) \times 24 \times 1.69 \times 12] / [AKS \times (\text{ÖA}/10000) \times 44]$$

Burada; AKA = Arazide soda-kirecin kazandığı ağırlık (gram), SKA = Standart kavanozlardaki soda-kirecin kazandığı ağırlık (gram), AKS = Arazide kalma süresi (saat dakika), Örn. Al. = Örnek Alanı (cm²) (kesilen plastik kapların kapladığı alan) dır.

Dinamik Metot

Toprak CO₂ salınımı ölçümlerinde daha hassas sonuçlar verdiği için değerlendirilen IRGA cihazı (LI-8100A, LI-COR) ile sadece mayıs ve eylül aylarında (ayda bir kez) ölçüm yapılmıştır. Cihaz ile ölçüm yapılmadan önce 20 cm çapında, 12 cm yüksekliğindeki plastik halkalar bir gün öncesinden örneklem alanı altındaki mineral toprağının 2 cm derinliğine kadar sabitlenmiştir. Takip eden gün içerisinde örneklem alanlarına gidilerek cihazla ölçüm gerçekleştirilmiştir. Toprak nemi (TN) ve toprak sıcaklığı (TS) da eş zamanlı olarak IRGA cihazı ile ölçülmüştür.

Toprak CH₄ Salınımının Belirlenmesi

Toprak metan gazı (CH₄) salınımı, sabit (statik) hücre (hazne) metoduna göre (static chamber method) belirlenmiştir (Nozhevnikova ve ark. 2003). Bu yöntemde, toprak yüzeyinden çıkan ve kovanın içerisine biriken metan gazı (Şekil 5), kovanın yüzeyine monte edilmiş, sızmaya karşı etrafı silikonlanmış ve açma kapama aparatı ile kontrol edilen plastik bir boru yardımıyla şırıngaya (12 ml.lik) çekilmiş ve küçük bir cam şişe örnek kabına aktarılmıştır. Güneş ısınmasından etkileşimini aza indirmek için kovanın etrafı ve üst yüzeyi alüminyum folyo ile sarılmıştır. Topraktan çıkan metan gazının kova içerisine girişinden emin olmak için kova mineral toprak içerisine 5 cm kadar iyice yerleştirilmiştir. Kova içerisine biriken metan gazının şırınga ile örneklenmesi 60 dakikayı geçmeyecek şekilde her 20 dakikada bir olacak şekilde 4 kez yapılmıştır (t₀ = 0, t₁, t₂ ve t₃). Ölçümler her bir örneklem alanında mayıs-haziran-temmuz-ağustos ve eylül aylarında, her bir ayın ilk haftasında olmak üzere ayda bir kez gerçekleştirilmiştir. Toplanan örneklerin metan gazı içeriği sonrasında gaz kromatografi yardımıyla analiz edilmiştir.

İstatistik Analizi

Çalışmada dışbudak ve kızılğacın üretim ve silvikültürel faaliyetlerinin yapıldığı meşcere tipleri ile doğal ve üretim yapılmayan meşcere tipleri arasındaki toprak özellikleri, toprak penetrasyon direnci (TPD) ve saliverilen CO₂ ve CH₄ miktarları arasındaki farklılıklar tek yönlü varyans analizi ile değerlendirilmiştir. Varyans analizi sonucunda anlamlı farklılıklar bulunması durumunda, ortalamaların

karşılaştırılması Duncan testi ile yapılmıştır. Daha sonra toprak CO₂ ve CH₄ salınımı ve diğer toprak özellikleri ve TPD ile etkileşimini ortaya koymak için regresyon

analizleri yapılmıştır. İstatistik işlemler SPSS istatistik paket programı (IBM SPSS 20.0) kullanılarak bilgisayar ortamında yapılmıştır.



Şekil 5. Toprakta salıverilen ve kova içerisinde biriken CH₄ miktarı 20 ml'lik şırınga ile 0-20-40-60 dakika sonunda çekilerek, cam şişenin içerisine aktarılmış, sonrasında gaz kromatografi yardımıyla analiz edilmiştir

BULGULAR ve TARTIŞMA

Meşcere Özellikleri

Ormancılık faaliyetlerinin (üretim/silvikültür) yapıldığı ve yapılmadığı dişbudak c ve d gelişme çağındaki meşcerelerde alınan örnekleme alanlarının bazı özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir. Doğal ortamdaki örnekleme alanlarındaki dişbudak ağaçlarının c ve d meşcerelerindeki ortalama yaşları sırasıyla 79 ile 83 yıl, boyları 15.5 ile 17.1 m ve çapları 33.5 cm ile 48.4 cm olarak belirlenirken, kızılğaçların ortalama yaşları 49 ile 57 yıl, boyları 26.8 ile 29.7 m ve çapları 26.2 ile 46.2 cm belirlenmiştir. Üretim ve silvikültürel faaliyetlerin yapıldığı örnekleme alanlarındaki meşcereler daha genç olup, dişbudak ağaçlarının c ve d meşcerelerindeki ortalama yaşları sırasıyla 68 ile 74 yıl, boyları 17.3 ile 20.4 m ve çapları 28.2 cm ile 37.9 cm olarak belirlenirken, kızılğaçların ortalama yaşları 43 ile 52 yıl, boyları 29.4 ile 32.2 m ve çapları 24.2 ile 39.4 cm belirlenmiştir (Çizelge 1).

Toprak Özellikleri

Örnekleme alanlarının bazı toprak özellikleri Çizelge 2'de verilmiştir. Toprak özellikleri genel olarak

değerlendirildiğinde, doğal dişbudak ve kızılğaç meşcerelerinin toprak elektriksel iletkenliği (EC), %nem, porozite, organik madde ve kil içeriklerinin üretim yapılan alanlara göre daha yüksek, hacim ağırlığı ve kum içeriğinin ise daha düşük tespit edilmiştir (p<0.05) (Çizelge 2). Toprak pH ve toz içeriği bakımından doğal ve üretim alanlarında önemli bir değişiklik belirlenmemiştir.

Toprak penetrasyon direnci en yüksek üretim alanlarında ölçülmüştür (Şekil 6). Doğal alanlardaki TPD değeri dişbudak için 283 ile 1012 kPa, kızılğaç için 190 ile 1568 kPa arasında değişim gösterirken, üretim alanlardaki değerler dişbudak için 794 ile 3125 kPa, kızılğaç için 659 ile 2090 kPa arasında değişim göstermiştir. Doğal dişbudak alanlarında TPD değerinin ilk 7.5 cm'ye kadar bir artış gösterdiği, sonrasında azalarak yatay bir seyir izlediği, kızılğaç alanlarında ise TPD değerindeki artışın 17.5 cm'ye kadar devam ettiği sonrasında keskin bir azalış gösterdiği görülmüştür (Şekil 6). Üretim yapılan dişbudak alanı topraklarındaki TPD değerleri, doğal alanda olduğu gibi, ilk 7.5 cm toprak derinliğine kadar hızlı bir artış gösterdikten sonra hızlı bir düşüşe geçtiği, kızılğaç alanlarında ise ilk 15 cm'ye kadar hızlı bir yükseliş sonrasında dalgalı bir şekilde artma eğilimi göstermiştir.

Çizelge 1. Örnekleme alanlarının meşcere özellikleri

Ormancılık faaliyeti	Meşcere tipi	Çap (cm) ort. ± s.s.	Boy (m) ort.± s.s.	Yaş (yıl) ort.± s.s.	Tepe kapallığı
Doğal	Dşc3	33.5 ± 2.24	15.5 ± 1.42	79 ± 2.12	Kapalı ve tam kapalı 3 (%71 - %100)
	Dşd3	48.4 ± 3.56	17.1±1.16	83 ± 3.25	
	Kzc3	26.2 ± 1.56	26.8 ± 1.51	49 ± 3.12	
	Kzd3	46.2 ± 2.67	29.7 ± 1.07	57 ± 1.21	
Üretim	Dşc3	28.2 ± 1.34	17.3 ± 0.54	68 ± 4.22	Kapalı ve tam kapalı 3 (%71 - %100)
	Dşd3	37.9 ± 1.26	20.4±2.26	74 ± 4.15	
	Kzc3	24.2 ± 0.56	29.4 ± 2.11	43 ± 1.12	
	Kzd3	39.4 ± 1.17	32.2 ± 2.47	52 ± 3.33	

Ort: Ortalama, S.S: Standart sapma

Çizelge 2. Örnekleme alanlarının bazı toprak özellikleri

Ormancılık faaliyeti	Meşcere tipi	Toprak derinliği (cm)	pH	EC dS m ⁻¹	Nem (%)	Hacim ağırlığı (g/cm ³)	Porozite (%)	Organik madde (%)	Kum (%)	Toz (%)	Kil (%)
Doğal	Dşc3	0-30	6.20a*	1.22b	31.5b	0.75a	71.7b	19.3c	49a	19a	32b
		>30	6.14a	1.12b	42.2d	0.87a	67.2b	17.7c	55a	15a	30b
	Dşd3	0-30	6.50a	0.87b	35.2b	0.66a	75.1d	17.7c	51ab	15a	34b
		>30	6.57a	0.93ba	45.3b	0.82a	69.1c	15.6c	55a	15b	30c
	Kzc3	0-30	6.90a	1.48b	38.3d	0.78a	70.6b	14.5b	48a	23a	29b
		>30	7.11a	1.35b	39.7cd	0.91a	65.7b	12.3b	56a	14a	30b
	Kzd3	0-30	6.45a	0.82b	34.9b	0.92b	65.3c	16.6c	45a	21a	34b
		>30	6.35a	0.78b	37.6a	1.03a	61.1b	14.5c	52a	14b	34c
Üretim	Dşc3	0-30	6.40a	0.25a	28.1a	1.30b	50.9a	10.6a	58b	17a	25a
		>30	6.45a	0.21a	30.2a	1.39b	47.5a	9.7a	62b	12a	26ab
	Dşd3	0-30	6.60a	0.28a	27.0a	1.52d	42.6a	9.8a	55bc	22a	23a
		>30	6.68a	0.27a	34.5a	1.77c	44.5a	7.2a	65b	9a	26b
	Kzc3	0-30	6.51a	0.48a	34.1c	1.24b	53.2a	11.2a	55b	24a	21a
		>30	6.59a	0.41a	36.4bc	1.33b	49.8a	10.2ab	61b	18a	21a
	Kzd3	0-30	6.55a	0.42a	35.2b	1.34c	49.4b	13.5b	59c	18a	23a
		>30	6.24a	0.44a	37.1a	1.41b	46.8a	12.1b	63b	18b	19a

*Sütunlardaki aynı küçük harfler, toprak özelliğinin her bir toprak derinlik kademesine göre meşcere tipleri arasında fark bulunmadığını (p>0.05) göstermektedir

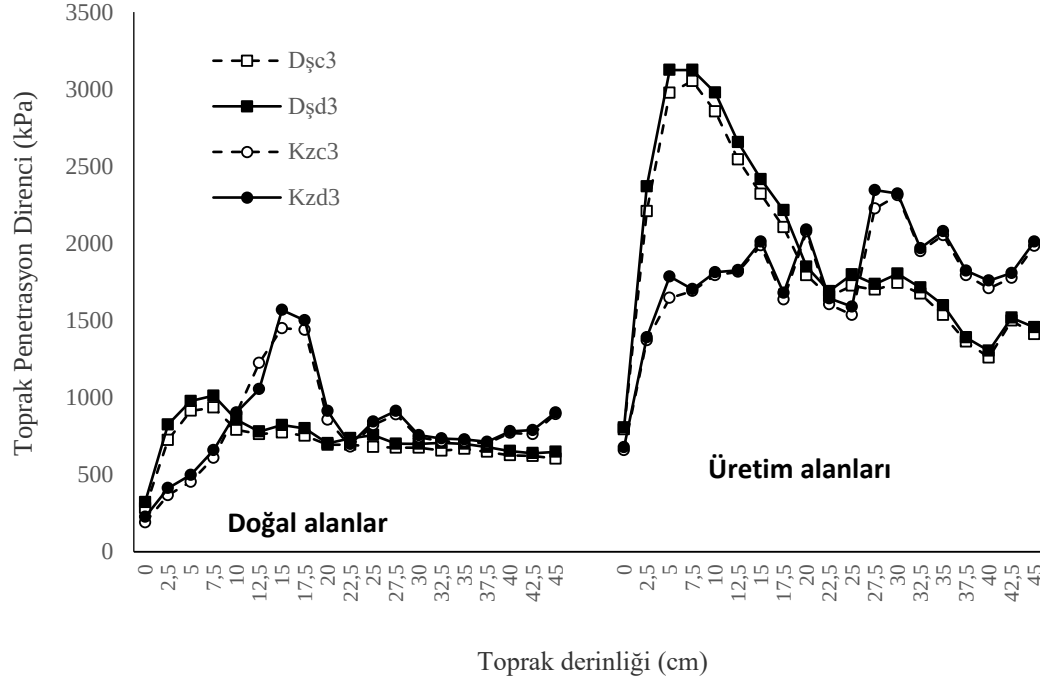
Üretim faaliyetlerinin yapıldığı meşcerelerinin üst ve alt topraklarında dışbudak için belirlenen ortalama 1.41 ve 1.58 g/cm³ ile kızılğaç için belirlenen 1.29 ve 1.37 g/cm³ hacim ağırlığı değerleri, doğal alandaki dışbudak (0.71 ve 0.85 g/cm³) ve kızılğaç (0.85 ve 0.97 g/cm³) değerleri ile karşılaştırıldığında, üretim faaliyetlerinin toprakta sıkışmaya neden olduğu açık olarak anlaşılmaktadır. Hacim ağırlığı toprakların su tutma kapasitesi, strüktür yapısı ve sıkışması hakkında bilgi sağlamakla beraber, doğal kök gelişmesinin sınırlandırılması için toprak hacim ağırlığının ince tekstürlü (kil ve toz) topraklarda 1.5 g/cm³ ten, kaba tekstürlü topraklarda ise 1.7 g/cm³ daha fazla olması beklenmektedir (Lyle 1987). Toprakların hacim ağırlığının optimal ve sınır değerleri toprak tekstürü, parçacık boyutu, yönetim uygulamaları ve organik maddeyle yakın ilişki içerisinde (Reichert ve ark. 2009). Toprak hacim ağırlığı değerinin 1.3 g/cm³'e eşit veya az olması topraklar için “iyi”, 1.3 – 1.55 g/cm³ arasında olması “orta”, 1.8 g/cm³ den yüksek olması ise “oldukça kötü” şartların olduğunun belirtisidir (Reichert ve ark. 2009). Çalışmamızda hacim ağırlığının “orta” düzeyde kalmasında subasar orman ekosistemlerinin toprak organik maddesinin yüksek olmasından kaynaklandığı değerlendirilmiştir.

Bunun yanında, üretim alanlarında ölçülen TPD değerlerinin, bitki kök gelişiminin ve toprakta yararlı mikroorganizmaların hareketliliğinin azalmasında sınır değerler olarak kabul edilen 2000-2500 kPa sınır

değerlerine (Gregory ve ark. 2006, Moebius-Clune ve ark. 2016) yakın olması ve hatta bazı yerlerde aşması (Şekil 6), üretim faaliyetlerinin toprak sıkışmasına neden olduğu sonucunu desteklemektedir.



Şekil 4. Toprak CO₂ salınımı örnekleme alanlarında Mayıs ve Eylül ayları ortasında IRGA cihazı (LI-8100A, LI-COR) ile ölçülmüştür



Şekil 6. Doğal ve üretim alanlarında toprak penetrometre direnci (kPa) Toprak sıkışması toprak ıslıkılık ölçer ile ölçülmüştür (Field Scout SC 900)

Toprak CO₂ Salınımı

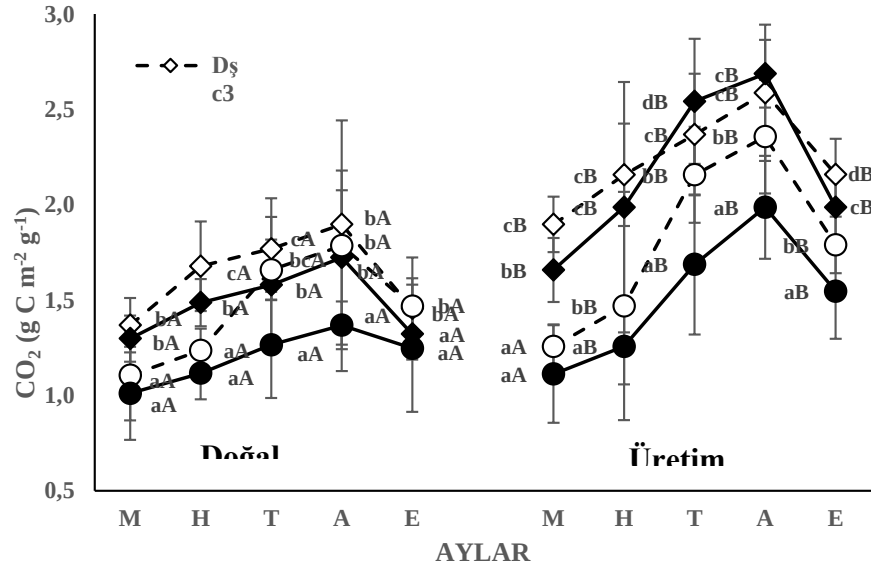
Soda kireç yöntemi kullanılarak doğal dişbudak ve kızılğaç alanlarında ölçülen ortalama toprak CO₂ salınım değerleri, ormancılık faaliyeti yapılan üretim alanlarından daha düşük bulunmuştur (Şekil 7). Doğal alanlarda, toprak CO₂ salınım değerleri dişbudak için 1.298 ile 1.723 g C m⁻² g⁻¹, kızılğaç için 1.011 ile 1.368 g C m⁻² g⁻¹, arasında değişirken, üretim alanlarında bu değerler dişbudak için 1.658 ile 2.687 g C m⁻² g⁻¹, kızılğaç için 1.112 ile 1.987 g C m⁻² g⁻¹, arasında belirlenmiştir.

Toprak CO₂ salınım değerleri hem doğal hem de üretim alanlarında Mayıs ayından Ağustos ayına kadar bir artış gösterdikten sonra Eylül ayı ölçümlerinde bir azalma göstermiştir. Her iki alanda da, c gelişim çağındaki meşcerelerden salıverilen toprak CO₂ miktarı, d gelişim çağındaki meşcerelere göre daha yüksek bulunmuştur (Şekil 7).

Soda kireç ölçümlerinde olduğu gibi, CO₂ ölçüm cihazı (Li-8100A, LI-COR) kullanılarak doğal dişbudak ve kızılğaç alanlarında Mayıs ve Eylül ayı için ölçülen ortalama toprak CO₂ salınım değerleri, ormancılık faaliyeti yapılan üretim alanlarından daha düşük bulunmuştur (Çizelge 3). Doğal alanlarda, Mayıs ayı toprak CO₂ salınım değerleri dişbudak için ortalama 3.140 µmol C m⁻² s⁻¹, kızılğaç için 2.668 µmol C m⁻² s⁻¹ iken, üretim alanlarında bu ortalamalar dişbudak için 4.326 µmol C m⁻² s⁻¹, kızılğaç için 3.190

µmol C m⁻² s⁻¹ olarak belirlenmiştir. Eylül ayı ölçüm değerleri Mayıs ayına göre daha yüksek bulunmuştur. Bununla beraber, Mayıs ayı için belirlenen doğal ve üretim alanları arasında farklılıklar Eylül ayı içinde aynı yönde farklılık göstermiştir, yani doğal alanlardaki CO₂ salınım değerleri üretim alanlarından daha düşük bulunmuştur. Doğal alanlarda, Eylül ayı toprak CO₂ salınım değerleri dişbudak için ortalama 4.733 µmol C m⁻² s⁻¹, kızılğaç için 4.056 µmol C m⁻² s⁻¹ iken, üretim alanlarında bu ortalamalar dişbudak için 5.727 µmol C m⁻² s⁻¹, kızılğaç için 4.493 µmol C m⁻² s⁻¹ olarak belirlenmiştir.

Toprak sıkışması, toprak işlevleri ve toprağın karbondioksit salınımı arasındaki ilişkiler oldukça karmaşık olup, konu ile yapılan arazi çalışma ve ölçüm çalışmalarında farklı sonuçlar bildirilmiştir. Örneğin, bazı araştırmacılar toprak CO₂ salınımının toprak sıkışması ile negatif yönde etkilendiğini bildirmiş (Goutal ve ark. 2012, Hartmann ve ark. 2014), sıkışmaya bağlı CO₂ salınımındaki azalmanın nedenini ise, (1) düşük aerobik şartlar altında karbon mineralizasyonundaki azalmaya (Ball ve ark. 1999) ve (2) toprak organik maddesinin fiziksel olarak daha güçlü korunmasına (Fleming ve ark. 2006, Gartzia-Bengoetxea ve ark. 2011) bağlamışlardır. Diğer yandan, bazı araştırmacılar, aşırı toprak sıkıştırmadan farklı olarak, orta düzeyde toprak sıkışmasının CO₂ salınımını arttırdığı sonucuna varmıştır; bunun nedeni olarak, yeterli oksijen kaynağına sahip olan taze organik maddenin bu esnada açığa çıkmasının mikrobiyal mineralizasyonu



Şekil 7: Doğal ve ormancılık faaliyetlerinin yapıldığı c ve d gelişim çağındaki dişbudak ve kızılğaç örnekleme alanlarında mayıs-eylül ayları arasında soda kireç yöntemi ile belirlenen topraktan karbondioksit (CO₂) salınımı. Meşcere gelişim çağına göre aylık değerler arasındaki farklılıklar küçük harflerle, doğal ve üretim alanlarındaki farklılıklar büyük harflerle gösterilmiştir (p<0.05)

Çizelge 3. Doğal ve ormancılık faaliyetlerinin yapıldığı c ve d gelişim çağındaki dişbudak ve kızılğaç örnekleme alanlarında mayıs ve eylül ayında Li-8100A, LI-COR cihazı ile belirlenen topraktan karbondioksit (CO₂) salınımı (µmol C m⁻² s⁻¹).

Ormancılık faaliyeti	Meşcere tipi	Mayıs ort. ± s.s.	Eylül ort.± s.s.
Doğal	Dşc3	3.258b* ± 0.210	4.987a ± 0.123
	Dşd3	3.021b ± 0.425	4.478a ± 0.268
	Kzc3	2.867a ± 0.445	4.147a ± 0.334
	Kzd3	2.468a ± 0.236	3.964a ± 0.147
Üretim	Dşc3	4.532c ± 0.168	5.897b ± 0.189
	Dşd3	4.119c ± 0.458	5.556b ± 0.187
	Kzc3	3.267b ± 0.557	4.729a ± 0.249
	Kzd3	3.112b ± 0.117	4.257a ± 0.148

*Sütunlardaki aynı küçük harfler, CO₂ salınımının meşcere tipleri arasında fark bulunmadığını (p>0.05) göstermektedir

artmasına bağlamışlardır (Hartmann ve ark. 2014). Bunlara ek olarak, yağmur sonrası toprak yüzeyinde sıkışmadan kaynaklı biriken suyun, toprak boşluklarındaki gazı yakalayabildiği, ölçüm sırasında salıverilen bu gazın sıkışmış topraklardaki yüksek CO₂ miktarından sorumlu olabileceği bildirilmiştir (Busman ve ark. 2021). Benzer şekilde Pla ve ark. (2017) yağmur olaylarından sonra belirlenen yüksek CO₂ miktarını düşük infiltrasyon kapasitesine ve çalışma alanlarındaki hidrolik geçirgenliğe bağlamışlardır. Çalışmada subasar alanlarında orta düzeyde gerçekleşen toprak sıkışmasının dişbudak ve kızılğaç meşcerelerinde CO₂ salınımını arttırdığı yönünde sonuçlar vermiştir.

Courtois ve ark. (2019) tropikal yağmur ormanlarında 16 adet Li-8100A, LI-COR cihazı kullanarak 4 ay boyunca (haziran-eylül) birçok ölçüm (17.592 adet) sonucunda belirledikleri toprak CO₂ salınımının 4.14-16.63 µmol C m⁻² s⁻¹ arasında değişiklik gösterdiğini, ortalama değerin ise 8.06 µmol C m⁻² s⁻¹ olduğunu bildirmiştir. Çalışmalarında, çok

nemli topraklarda toprak CO₂ salınımının oldukça düşük olduğunu, benzer sonucun aynı ormanlarda çalışmalar gerçekleştiren Rowland ve ark. (2014) tarafından da bildirildiğini ifade etmişlerdir. Oertel ve ark. (2016) tarafından derleme olarak hazırlanan çalışmada, doğal sulak alan topraklarından salınan CO₂ miktarı yarı tropikal iklimde 2.00 µmol C m⁻² s⁻¹, ılıman iklimde 2.55 µmol C m⁻² s⁻¹ ve Akdeniz ikliminde 5.47 µmol C m⁻² s⁻¹ olarak bildirilmiştir. Çalışmadan elde edile bulgular genel olarak Oertel ve ark. (2016) tarafından sulak alanlar için bildirilen değerler arasında yer almıştır. Bununla beraber, karasal orman ekosistemleri için bildirilen CO₂ salınım değerlerinden daha yüksek düzeyde değerler tespit edilmiştir. Karasal orman ekosistemlerinde, 1960-2007 yılları arasında toprak solunumu ile ilgili 818 çalışmaya ait sonuçları derleyen Bond-Lamberty ve Thompson (2010), ortalama CO₂ salınımını boreal ormanlar için 1.01 ± 0.60, ılıman ormanlar için 1.97 ± 1.11, tropikal ormanlar için 3.40 ± 1.67 ve küresel

orman ekosistemleri için genel ortalama değeri $2.28 \pm 50 \mu\text{mol C m}^{-2} \text{s}^{-1}$ olarak bildirmiştir.

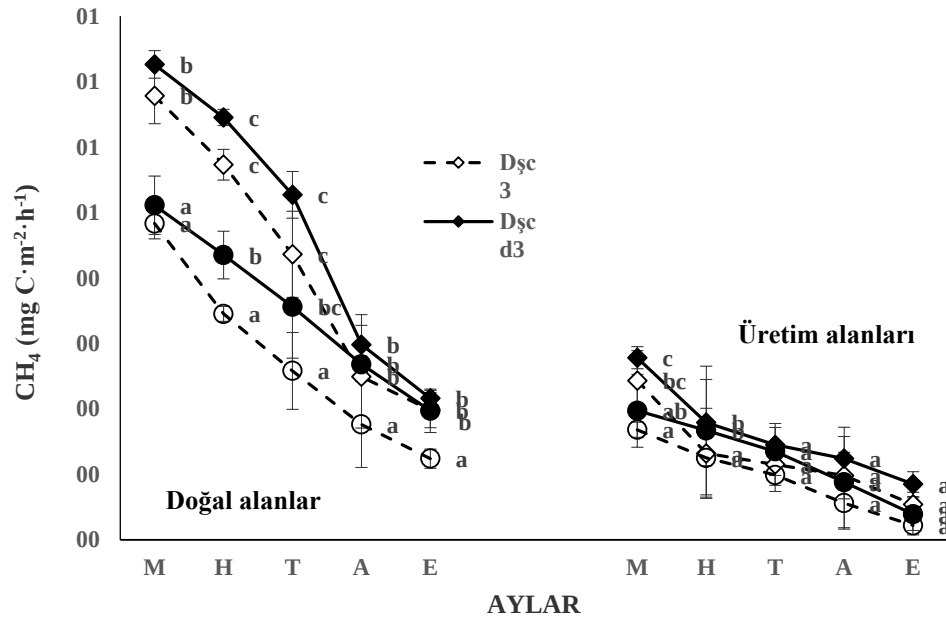
Toprak CH₄ Salınımı

Toprak CO₂ salınımından farklı olarak, toprak CH₄ salınımı doğal dışbudak ve kızılğaç alanlarında üretim alanlarına göre daha yüksek bulunmuştur (Şekil 8). Doğal alanlarda, toprak CH₄ salınım değerleri dışbudak için 0.198 ile 0.726 mg C m⁻² h⁻¹, kızılğaç için 0.124 ile 0.511 mg C m⁻² h⁻¹, arasında değişirken, üretim alanlarında bu değerler dışbudak için 0.054 ile 0.278 mg C m⁻² h⁻¹, kızılğaç için 0.022 ile 0.197 mg C m⁻² h⁻¹, arasında belirlenmiştir. Toprak CH₄ salınım değerleri ölçüm aylarına ve meşcere gelişim çağlarına göre toprak CO₂ salınımının tersi bir eğilim göstermiştir. Toprak CH₄ salınımı hem doğal hem de üretim alanlarında Mayıs ayından Eylül ayına doğru azalan bir eğilim izlemiştir. Her iki alanda da, d gelişim çağındaki meşcerelerden salıverilen toprak CH₄ miktarı, c gelişim çağındaki meşcerelerinden daha yüksek bulunmuştur (Şekil 8).

Literatürde, yeryüzünün farklı iklimine sahip sulak ve subasar alanlarında yapılmış CH₄ salınımını ile ilgili çalışmalar incelendiğinde, bulgularımızdan daha yüksek sonuçlara rastlanıldığı gibi daha düşük ya da yakın sonuçlarında olduğu anlaşılmaktadır. Örneğin, Nahlik ve Mitsch (2011) Kosta Rika'nın tropikal sığ sulak alanları için ortalama CH₄ salınımını 30 mg CH₄-C m⁻² h⁻¹ olarak tespit etmiştir. Bass ve ark. (2014)

Kuzey Avustralya'nın subasar alanlarda gerçekleştirdikleri çalışmada ortalama CH₄ salınımını 25 mg CH₄-C m⁻² h⁻¹ olarak bildirmiştir. Devol ve ark. (1988) Amazon bölgesi için ortalama değeri 11 mg CH₄-C m⁻² h⁻¹ olarak rapor ederken, Belger ve ark. (2011) Amazonun yukarı subasar alanları için ortalama CH₄ salınımını 2 mg CH₄-C m⁻² h⁻¹ olarak bildirmiştir. Kayranlı ve ark. (2010) tarafından derlenen ve yeryüzünün farklı sulak alan ekosistemlerinden (yapay sulak alanlar dahil) salıverilen CH₄ miktarlarının özetlendiği çalışmada, CH₄ salınımının -1.3 ile 93 mg CH₄-C m⁻² h⁻¹ arasında geniş aralıklara sahip olduğunu anlaşılmaktadır. Bulgularımız Kayranlı ve ark. (2010) tarafından sulak alanlar için bildirilen değerler arasında yer almıştır.

Genel olarak, toprak sıkışmasının anoksik koşulların oluşmasını kolaylaştırdığı, böylece etkili bir sera gazı olan metanın üretimini ve atmosfere salınmasını arttırdığı ifade edilmektedir (Cambi ve ark. 2015). Bununla beraber bazı araştırmacılar, örneğin Teepe ve ark. (2004) toprak sıkışmasının CH₄ salınımını yüzde 90'a kadar azaltabileceğini, tozlu killi balçık topraklarda ise toprak makro boşlukların azalması ve su ile dolu alanların artması sebebiyle bir CH₄ kaynağı olabileceğini rapor etmiştir. Ek olarak, tomruk çekici tekerleklerinin mineral toprakla humus tabakasını karıştırarak yeni bir tabaka oluşturduğunu, bu tabakanın da toprakla atmosfer arasındaki gaz değişimini azalttığını vurgulamışlardır. Bulgularımız Teepe ve ark. (2004) tarafından ortaya konulan sonuçları destekler yöndedir.



Şekil 8: Doğal ve ormancılık faaliyetlerinin yapıldığı c ve d gelişim çağındaki dışbudak ve kızılğaç örnekleme alanlarında Mayıs-Eylül ayları arasında soda kireç yöntemi ile belirlenen topraktan metan (CH₄) salınımı. Meşcere gelişim çağlarına göre aylık değerler arasındaki farklılıklar küçük harflerle gösterilmiştir ($p < 0.05$). Doğal ve üretim alanları arasındaki aylık değerler önemli farklılık göstermiştir ($p < 0.05$)

Örnek alanlarda belirlenen toprak CO₂ ve CH₄ salınımı ile çalışmada belirlenen bazı toprak özellikleri ilişkisi getirildiğinde ise (Çizelge 4), toprak CO₂ salınımı için pozitif yönlü en güçlü ilişkinin TPD ve kum ile, negatif yönlü ilişkinin ise toprak nem ve porozite arasında belirlenmiştir. Toprak CH₄ salınımı ise toprak CO₂ salınımına tezat olarak TPD ve kum ile negatif, toprak nem ve porozite ile negatif bir ilişki göstermiştir. Busman ve ark. (2021) tropikal turbalık alanlarda sıkışmanın toprak CO₂ ve CH₄ salınımına etkisini araştırdıkları çalışmalarında, toprak hacim ağırlığının (sıkışmanın) artışına bağlı olarak toprakta nemin tutulma süresinin arttığını ve porozitenin azaldığını bildirmiş, topraktan CH₄ salınımının toprak sıkışmasına bağlı olarak %22 azaldığını, tezat olarak zamanla yağmur suyunun infiltrasyonunun ve perkolasyonunun yavaşlamaya başladığında, CO₂ salınımının daha fazla olduğunu rapor etmiştir. Bu çalışma toprak CO₂ ve CH₄ salınımının azalmasının veya artmasının sebeplerini detaylı olarak araştırmaya yönelik planlanmadığı için bu konuda toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini daha detaylı analiz edecek çalışmalara ihtiyaç bulunmaktadır.

Sonuç olarak, subasar ormanlardaki ormancılık faaliyetlerinin toprak özelliklerini değiştirdiği, özellikle hacim ağırlığı ve toprak penetrasyon direncini artırarak, topraktan CO₂ salınımını arttırdığı, fakat CH₄ salınımını azalttığına yönelik Türkiye’den ilk sayısal veriler ortaya konulmuştur. Üretim yapılan dişbudak ve kızılgağaç meşcerelerindeki CO₂ salınımının, doğal meşcerelere göre daha fazla olmasının muhtemel sebepleri arasında, üretim alanlarındaki toprak sıkışmasının, toprakların yüksek organik madde içeriği nedeniyle orta düzeyde kalmasından ve ormancılık faaliyetlerinin ortamdaki mikrobiyal mineralizasyonu arttırmamasından kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Aynı alanda, toprak sıkışmasının toprak makro boşlukların azalması ve su ile dolu alanların artmasına sebep olmasının CH₄ salınımının artmasını teşvik etmiş olabileceği değerlendirilmiştir. Bununla beraber, genel bir değerlendirmeye varmak için konu ile ilgili daha fazla ve daha uzun döneme ait çalışmalara ve toprak sıkışmasından kaynaklı mikroorganizma tür, çeşit ve yoğunluklarını ortaya koyacak çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Çizelge 4. Toprak CO₂ ve CH₄ salınımı ile toprak üst ve alt özellikleri arasındaki korelasyon

Toprak özellikleri	Dinamik metot CO ₂ salınımı	Statik metot CO ₂ salınımı	Statik metot CH ₄ salınımı
TPD (kPa)	+0.735**	+0.775**	-0.919**
Porozite (%)	-0.653*	-0.757**	+0.909**
OM (%)	-0.629*	-0.747**	+0.719**
HA (g/cm ³)	+0.654*	+0.717**	-0.608*
Nem (%)	-0.887**	-0.890**	+0.920**
Kum (%)	+0.758**	+0.717**	-0.769**
Toz (%)	-0.188ns	-0.032ns	-0.442ns
Kil (%)	-0.607*	-0.646*	+0.651*

TPD: toprak penetrasyon direnci OM: organik madde, HA: hacim ağırlığı, ns: anlamlı değil

TEŞEKKÜR

Sunulan çalışma, TÜBİTAK 1001 projesi kapsamında (Proje No 121O702) desteklenmiştir. Bu bakımdan TÜBİTAK’a teşekkürlerimizi sunarız. LI-8100A, LI-COR cihazı ile CO₂ ölçümlerinin gerçekleşmesinde, cihazın sağlandığı Eskişehir Orman Toprak ve Ekoloji Araştırma Enstitüsü Müdürü Sayın Cezmi ÖZEL’e ve ölçümlere arazide destek sağlayan kurum çalışanları Dr. Aliye Sepken KAPTANOĞLU ve Abdullah SARİMEHMETOĞLU’na teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

Akay AE, Gencal B, Taş İ (2017) Spatiotemporal change detection using landsatimagery: the case study of Karacabey flooded forest, Bursa, Turkey. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume IV-4/W4, 4th International GeoAdvances Workshop, 14–15 October, Safranbolu, Karabük, Turkey.

Akburak S (2008) Belgrad ormanında farklı ağaç türleri altında toprak solunumunun mevsimsel değişimi. İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, İstanbul.

Baek K, Lee E, Choi H, Cho M, Choi Y, Han S (2022) Impact on soil physical properties related to a high mechanization level in the row thinning of a Korean pine stand. Land, 11(3): 329.

Ball BC, Parker JP, Scott A (1999) Soil and residue management effects on cropping conditions and nitrous oxide fluxes under controlled traffic in Scotland. Soil and Tillage Research, 52(3-4): 191-201.

Bass AM, O’Grady D, Leblanc M, Tweed S, Nelson PN, Bird MI (2014) Carbon dioxide and methane emissions from a wet-dry tropical floodplain in northern Australia. Wetlands, 34 (3): 619–627.

Belger L, Forsberg BR, Melack JM (2011) Carbon dioxide and methane emissions from interfluvial wetlands in the upper Negro River basin, Brazil. Biogeochemistry, 105:171–183.

Blake GR, Hartge KH (1986) Particle density in methods of soil analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods (Ed. Klute A). American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.

- Bolat İ, Melemez K, Özer D (2015) The influence of skidding operations on forest soil properties and soil compaction in Bartın, Turkey. *European Journal of Forest Engineering*, 1(1): 1-8.
- Bond-Lamberty B, Thompson A (2010) A global database of soil respiration data. *Biogeoscience*, 7: 1915–1926.
- Bouyoucos GJ (1962) Hydrometer method im-proved for making particle size analysis of soils. *Agronomy Journal*, 54: 464-465.
- Bubier JL, Bhatia G, Moore TR, Roulet NT, Lafleur PM (2003) Spatial and temporal variability in growingseason net ecosystem carbon dioxide exchange at a large peatland in Ontario, Canada. *Ecosystems*, 6(4): 353-367.
- Busman NA, Maie N, Ishak CF, Sulaiman MF, Melling L (2021) Effect of compaction on soil CO₂ and CH₄ fluxes from tropical peatland in Sarawak, Malaysia. *Environment, Development and Sustainability*, 23 (8): 11646–11659.
- Calhoun AJK (1999) Forested wetlands. In: Hunter, M.L., Ed. *Maintaining Biodiversity in Forested Ecosystems*, Cambridge, England, Cambridge University Press, 300–331.
- Cambi M, Certini G, Neri F, Marchi E (2015) The impact of heavy traffic on forest soils: a review. *Forest Ecology and Management*, 338: 124-138.
- Courtois EA, Stahl C, Burban B, Berge Jvd, Berveiller D, Bréchet L, Soong JL, Arriga N, Peñuelas J, Janssens IA (2019) Automatic high-frequency measurements of full soil greenhouse gas fluxes in a tropical forest. *Biogeosciences*, 16: 785–796.
- Devol AH, Richey JE, Clark WA, King SL, Martinelli LA (1988) Methane emissions to the troposphere from the Amazon floodplain. *Journal of Geophysical Research*, 93: 1583–1592.
- Fleming RL, Laporte MF, Hogan GD, Hazlett PW (2006) Effects of harvesting and soil disturbance on soil CO₂ efflux from a jack pine forest. *Canadian Journal of Forerest Research*, 36: 589–600.
- Gartzia-Bengoetxea N, Camps Arbestain M, Mandiola E, Martínez de Arano I (2011) Physical protection of soil organic matter following mechanized forest operations in *Pinus radiata* D. Don plantations. *Soil Biology and Biochemistry*, 43: 141–149.
- Gibson KS, Neher DA, Johnson NC, Parmenter RR, Antoninka AJ (2023) Heavy logging machinery impacts soil physical properties more than nematode communities. *Forests*, 14: 1205.
- Gregory JH, Dukes MD, Jones PH, Miller GL (2006) Effect of urban soil compaction on infiltration rate. *Journal of Soil and Water Conservation*, 61(3): 117–124.
- Goutal N, Parent F, Bonnaud P, Demaison J, Nourrisson G, Epron D, Ranger J (2012) Soil CO₂ concentration and efflux as affected by heavy traffic in forest in northeast France. *European Journal of Soil Science*, 63: 261–271.
- Gutenberg L, Krauss KW, Qu JJ, Ahn C, Hogan D, Zhu Z, Xu C (2019) Carbon dioxide emissions and methane flux from forested wetland soils of the great dismal swamp, USA. *Environmental Management*, 64:190–200.
- Gürsoy S (2021) Soil compaction due to increasedmachinery intensity in agricultural production: Its main causes, effects and management. In A. Fiaz, & Muhammad, SE. (Eds.), *Technology in Agriculture*, IntechOpen .
- Hartmann M, Niklaus P, Zimmermann S, Schmutz S, Kremer J, Abarenkov K, Lüscher P, Widmer F, Frey B (2014) Resistance and resilience of the forest soil microbiome to logging-associated compaction. *The ISME Journal*, 8:226–244.
- Kayranlı B, Scholz M, Mustafa A, Hedmark A (2010) Carbon storage and fluxes within freshwater wetlands: a critical review. *Wetlands*, 30: 111-124.
- Keçeli T, Ursavaş S (2019) Contributions to the liverwort and hornwort (Marchantiophyta and Anthocerotophyta) flora of Kocaçay Delta (Karacabey-Bursa) floodplain forest. *Anatolian Bryology*, 5 (1): 45-55.
- Lyle ES (1987) Surface mine reclamation manual. New York Elsevier Science Publishing, 75-84.
- Margesin R, Schinner F (2005) Manual for soil analysis. *Soil Biology*, Vol. 5. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- McLaughlin JW, Gale MR, Jurgensen MF, Trettin CC (2000) Soil organic matter and nitrogen cycling in response to harvesting, mechanical site preparation, and fertilization in a wetland with a mineral substrate. *Forerest Ecology and Management*, 129: 7–23.
- MGM (2023) Meteoroloji Genel Müdürlüğü. Karacabey Meteoroloji İstasyonu 2023 Verileri.
- Moebius-Clune BN, Moebius-Clune DJ, Gugino BK, Idowu OJ, Schindelbeck RR, Ristow AJ, van Es HM, Thies JE, Shayler HA, McBride MB, Kurtz KSM, Wolfe DW, Abawi GS (2016) Comprehensive assessment of soil health- the cornell framework. Edition 3.2, Cornell University, Geneva, NY.
- Mwanake RM, Gettel GM, Wangari EG, Glaser C, Houska T, Breuer L, Butterbach-Bahl K, Kiese R (2023) Anthropogenic activities significantly increase annual Greenhouse Gas (GHG) fluxes from temperate headwater streams in Germany. *Biogeosciences*, 20: 3395–3422.
- Nahlik AM, Mitsch WJ (2011) Methane emissions from tropical freshwater wetlands located in different climatic zones of Costa Rica. *Global Change Biology*, 17: 1321–1334.
- Nawaz MF, Bourrie G, Trolard F (2013) Soil compaction impact and modelling: a review. *Agronomy for sustainable development*, 33(2): 291–309.
- Nozhevnikova A, Glagolev M, Nekrasova V, Einola J, Sormunen K, Rintala J (2003) The analysis of methods for measurement of methane oxidation in landfills. *Water Science and Technology*, 48: 45-52 .
- Oertel C, Matschullat J, Zurba K, Zimmermann F, Erasmı S (2016) Greenhouse gas emission from soils-a review. *Geochemistry*, 76 (3): 327-352.
- Pla C, Cuezva S, Martinez-Martinez J, Fernandez-Cortes A, Garcia-Anton E, Fusi N (2017) Role of soil pore structure in water infiltration and CO₂ exchange between the atmosphere and under- ground air in the vadose zone: a combined laboratory and field approach. *Catena*, 149: 402–416.
- Raich JW, Bowden RD, Steudler PA (1990) Comparison of two static chamber techniques for determining carbon dioxide efflux from forest soils. *Soil Science Society of America Journal*, 54: 1754–1757.
- Raich JW, Tüfekçioğlu A (2000) Vegetation and soil: correlations and controls. *Biogeochemistry*, 48(1): 71-90.
- Reichert JM, Suzuki LEAS, Reinert DJ, Horn R, Håkansson I (2009) Reference bulk density and critical degree of compaction for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil and Tillage Research*, 102: 242-254.
- Rhoades JD (1996) Salinity, electrical conductivity, and total dissolved solids. In DL Sparks (ed.) *Methods of Soil Analysis*. Part 3. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI, p.p: 17-435.
- Sakin E, Sakin ED, Kızılgöz İ, Seyrek A (2016) Orman örtüsü altındaki toprakların karbondioksit emisyonunun ölçülmesi. *Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*, 20(2): 127-134.
- Sarıyıldız T, Tanı M (2023) Root biomass and root carbon and nitrogen stocks of ash, alder, and oak stands in Karacabey floodplain forest. *Forestist*, 73(1): 97-107.
- Shepard JP (1994) Effects of forest management on surface water quality in wetland forests. *Wetlands*, 14(1): 18-26.
- Smith C (2007) Synthesis of technical information on forest wetlands in Canada. Tarım ve Orman Bakanlığı 2. Bölge Müdürlüğü (2020). Bursa ili Koca çay Deltası Sulak Alan Yönetim Planı Nihai Raporu (2021-2025). Tarım ve Orman Bakanlığı 2. Bölge Müdürlüğü. Ankara.
- Teepe R, Brumme R, Beese F, Ludwig B (2004) Nitrous oxide emission and methane consumption following compactionof forest soils. *Soil Science Society of America Journal*, 68: 605-611.
- Thomas GW (1996) Soil pH and soil acidity. p. 475-490. In D.L. Sparks (ed.) *Methods of Soil Analysis*. Part 3. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI.
- Tüfekçioğlu A, Küçük M (2004) Soil respiration in young and old oriental spruce stands and in adjacent grasslands in Artvin, Turkey. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 28(6): 429-434.
- UNCCD (2017) *The global land Outlook*. First Edition.
- Wang X, He J, Bai M, Liu L, Gao S, Chen K, Zhuang H (2022) The impact of traffic-induced compaction on soil bulk density, soil stress distribution and key growth indicators of maize in north China plain. *Agriculture*, 12(8): 1220.
- Williamson JR, Neilsen WA (2000) The influence of forest site on rate and extent of soil compaction and profile disturbance of skid trails during ground-based harvesting. *Canadian Journal of Forest Research*, 30: 1196–1205.