



CO₂ Release from a Soil with Improved Organic Matter Content with Farmyard Manure and Biochar under the Irrigation Conditions with Different Water Sources

Caner Yerli^{1,a,*}, Ustun Sahin^{2,b}

¹Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture, Van Yuzuncu Yil University, 65090 Van, Türkiye

²Department of Agricultural Structures and Irrigation, Faculty of Agriculture, Ataturk University, 25030 Erzurum, Türkiye

*Corresponding author

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p><i>Research Article</i></p> <p>Received : 16-02-2023 Accepted : 16-03-2023</p> <p><i>Keywords:</i> Farmyard manure Treated wastewater Biochar Soil moisture and temperature CO₂ and H₂O release from soil</p>	<p>In this study, CO₂ and H₂O release from soil and soil moisture and temperature values were investigated in a one-month wetting-drying cycle under conditions of irrigation of the incubated soil where different organic matter levels [1.21%(control) 1.5%, 2.5%, 3.5% and 4.5%] were obtained by applying farmyard manure and biochar to the soil to improve the soil organic matter content, with freshwater and treated wastewater. The results of the study showed that the CO₂ release increased from 29% to 146% in the improved organic matter content of the soil with farmyard manure compared to the control application, while the organic matter levels of 1.5% and 2.5% of the biochar were statistically similar to the control application, but the organic matter, which increased more with biochar, increased the release by 28% and 81% compared to the control application. Irrigation with treated wastewater resulted in 40% more CO₂ release than freshwater. While the increased organic matter content of the soil with farmyard manure and biochar results in less H₂O release from the soil and more soil moisture, unlike farmyard manure, biochar's feature of reducing H₂O release and protecting soil moisture has come to the fore. Higher soil moisture had a reducing effect on soil temperature in applications with high moisture. In addition, CO₂ release from the soil showed a significant positive linear relationship with soil moisture, but the effect with soil temperature was insignificant. To improve soil organic matter, the use of biochar, instead of farmyard manure, by reducing CO₂ and H₂O emissions from the soil and preserving soil moisture is an important result, but the use of biochar as an environmentally friendly application, especially in wastewater irrigation conditions, was found to be recommendable as a result of this study.</p>

Türk Tarım – Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi, 11(3): 522-531, 2023

Farklı Sulama Suyu Kaynaklarıyla Sulama Koşullarında Ahır Gübresi ve Biyoçarla Organik Madde İçeriği Geliştirilmiş Topraktan CO₂ Salınımı

MAKALE BİLGİSİ	ÖZ
<p><i>Araştırma Makalesi</i></p> <p>Geliş : 16-02-2023 Kabul : 16-03-2023</p> <p><i>Anahtar Kelimeler:</i> Ahır gübresi Aritılmış atık su Biyoçar Toprak nemi ve sıcaklığı Topraktan CO₂ ve H₂O salınımı</p>	<p>Bu çalışmada toprak organik madde içeriğini iyileştirmek için toprağa ahır gübresi ve biyoçar uygulanarak farklı organik madde seviyelerinin [%1,21 (kontrol) %1,5, %2,5, %3,5 ve %4,5] elde edildiği inkübe toprağın temiz su ve arıtılmış atık suyla sulanması koşullarında bir aylık ıslanma-kuruma döngüsünde topraktan CO₂ ve H₂O salınımı ile toprak nemi ve sıcaklığı değerleri araştırılmıştır. Çalışmanın sonuçları kontrol uygulamasına göre ahır gübresiyle toprağın iyileştirilen organik madde içeriğinde CO₂ salınımının %29'dan %146'a kadar arttığını gösterirken biyoçarın %1,5 ve 2,5 organik madde seviyelerinin kontrol uygulamasıyla istatistiksel olarak benzer olduğunu ancak biyoçarla daha fazla artan organik madde katkısının kontrol uygulamasına göre salınımı %28 ve %81 arttırdığını belirlemiştir. Arıtılmış atık suyla sulama temiz suya göre %40 daha fazla CO₂ salınımıyla sonuçlanmıştır. Ahır gübresi ve biyoçarla toprağın artan organik madde katkısı topraktan daha az H₂O salınımı ve daha fazla toprak nemi sağlamış ve ahır gübresinin aksine biyoçarın H₂O salınımını azaltıcı ve toprak nemini koruyucu etkisi belirlenmiştir. Toprak neminin daha fazla olması nemin yüksek bulunduğu uygulamalarda toprak sıcaklığını azaltıcı bir etki ortaya çıkarmıştır. Ayrıca topraktan CO₂ salınımı toprak nemi ile önemli pozitif doğrusal ilişki göstermiş ancak toprak sıcaklığıyla olan etkisi önemsiz olmuştur. Toprak organik maddesini iyileştirmek için ahır gübresi yerine biyoçarın topraktan CO₂ ve H₂O salınımlarını azaltıcı ve toprak nemini koruyucu özelliklerinden yararlanılması önemli bir sonuç olmakla beraber özellikle atık suyla sulama koşullarında biyoçarın çevre dostu bir uygulama olarak kullanımı bu çalışmanın sonucunda önerilebilir olarak bulunmuştur.</p>

^a caneryerli@yyu.edu.tr

^b <https://orcid.org/0000-0002-8601-8791>

^c ussahin@atauni.edu.tr

^d <https://orcid.org/0000-0002-1924-1715>



Giriş

Toprak organik maddesi toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik formlarını düzenleyerek bitkisel verim artışını desteklemektedir. Organik madde toprağın besin mevcudiyetine, su tutma kapasitesine, biyolojik aktivitesine ve katyon değişim kapasitesine pozitif katkılar sunarken (Topçu ve ark., 2022) toprakta artan organik madde mevcudiyeti toprak besin elementlerinin bitkiler tarafından kullanılabilirliğini arttırmakta, ağır metal ve bazı diğer kirletici unsurların çevresel etkilerini sınırlamakta ve toprak mikroorganizmalarına enerji kaynağı sağlamaktadır (Taban ve ark., 2013). Organik maddenin tüm bu toprak özelliklerini geliştirici etkisi doğrudan bitkisel verim üzerinde de olumlu sonuçları ortaya çıkarmaktadır.

Toprak organik maddesinin geliştirilmesinde çeşitli gübreler, farklı içeriğe sahip kompostlar, işlenmiş atıklar ve bazı organik materyallerden yararlanılmaktadır. Ancak ahır gübresi gibi organik gübreler ekonomik olmanın ve kolay ulaşımın yanında toprak verimliliğini artırmaları sebebiyle de tarımsal üretimde sıkça tercih edilmektedirler (Zhang ve ark., 2020). Özellikle son yıllarda tarımsal üretimde artan kimyasal gübre girdileri ahır gübresi gibi çeşitli organik gübrelerin tarımda kullanım olanağını daha da artırmıştır (Assefa ve Tadesse, 2019). Aslında bu durum tarımsal üretimde ekonomik bir üretim stratejisi olarak toprak verimliliğini de artırmanın yanı sıra atık yönetimini de sağladığı için arzu edilen bir üretim modelidir. Ancak ahır gübresiyle toprakta zenginleştirilmiş organik karbonla birlikte toprağın artan mikrobiyal aktivitesi topraktan CO₂ salınımlarında artışa yol açabilir. Altıkat ve ark. (2018) toprağa uygulanan ahır gübresinin topraktan CO₂ salınımını %14 ile %38 aralığında artırdığını ifade etmişlerdir. Ahır gübresiyle toprakta artan organik karbon oksijenle birleşerek topraktan CO₂ formunda ayrılmakta ve atmosfere salınmaktadır (Yerli ve ark., 2022a).

Atmosferde artan CO₂ ile gerçekleşen küresel ısınmaya eşlik eden nüfus yoğunluğu temiz su kaynakları üzerindeki baskıyı artırarak kişi başına düşen su arzını önemli seviyede azaltmaktadır (Ungureanu ve ark., 2020). Küresel ısınmaya bağlı olarak gerçekleşen iklim değişikliğinin temiz su kaynaklarını kirletme ve azaltma potansiyelinin %20 olduğu belirtilmektedir (FAO, 2007). 2025 yılında dünya çapında yaklaşık 3,5 milyon insanın su kıtlığı yaşayabileceği tahmin edilmekte ve bu miktarın artan nüfus ve şiddetlenen küresel ısınma etkisiyle önemli seviyede artacağına da dikkat çekilmektedir (FAO, 2012). Tarımın temiz su kaynaklarını en fazla tüketen sektör olduğu dikkate alındığında azalan ve kirlenen su kaynaklarının en büyük ölçekte tarım sektörünü dolayısıyla gıda üretimini etkileyici kesindir. Bu durum hali hazırda var olan gıda krizi riskinin artmasına önemli seviyede alt yapı oluşturacaktır. Mancosu ve ark. (2015) 2050 yılında artan dünya gıda ihtiyacını karşılamak için temiz su mevcudiyetinin %53 artırılması gerektiğini ifade etmişlerdir.

Temiz su kaynaklarının korunmasının ve sürdürülebilirliğinin sağlanmasının bir gereklilik olduğu günümüz koşullarında sulamada temiz su kaynaklarının yerine alternatif su kaynaklarının kullanılması ve su kullanım etkinliğinin artırılması bir zorunluluk haline almıştır. Alternatif su kaynaklarının başında gelen arıtılmış atık sular bu gerekliliği yerine getirmenin yanı sıra toprağın

özelliklerini geliştirerek bitkisel verimin ve kalitenin artması olanağını da ortaya çıkarmaktadır. Ayrıca arıtılmış atık su içermiş olduğu organik ve inorganik içerikleriyle potansiyel bir besin kaynağı olarak gübre ihtiyacını azaltıp daha ekonomik bir üretime katkı sağladığı gibi (Qin ve Horvath, 2020) atık suyun çevreye deşarjını da azaltarak çevresel sürdürülebilirliğin ve kaynakların korunumu avantajlarını da ortaya çıkarmaktadır. Ancak atık suyun toprağa sağlamış olduğu yüksek organik karbon katkısı topraktan CO₂ salınımlarını tetikleyebilir. Kudal ve Müftüoğlu (2014) arıtılmış atık suların sulamada kullanımında toprak organik karbon içeriğinin önemli seviyede arttığını bildirmişlerdir. Arıtılmış atık suyla sulama koşullarında bu artışın temiz suyla sulamaya göre topraktan CO₂ salınımını 2,5 kat artırdığı farklı bir çalışma neticesinde ortaya konulmuştur (Fernández-Luqueño ve ark., 2010).

Toprakta CO₂ salınımını düzenleyici bir uygulama olarak biyoçarın toprağa uygulanması son zamanlarda oldukça ilgi duyulan bir konudur (Yerli ve ark., 2022a). Günümüzde temiz su kaynaklarının sürdürülebilirliğinin sağlanması için arıtılmış atık suyla sulamaların gerçekleştirildiği koşullarda biyoçar salınımları azaltıcı pratik ve çevre dostu bir uygulama olarak kullanılabilir. Ayrıca ahır gübresi gibi organik gübrelerin veya kimyasal formlara sahip sentetik gübrelerin yerine de kullanım imkanı olan biyoçar toprağın eksik besin element formlarını tamamlamanın yanı sıra toprağa organik madde katkısı da sunmaktadır (Jones ve ark., 2011). Bu durum toprak verimliliğinin yanında bitkisel üretimde verim artışını da desteklemektedir. Biyoçarın toprağa ilavesi toprakta yüzyıllarca depolanacak inatçı karbon mekanizmasını temsil ettiği için (Laird, 2008; Lehmann ve ark., 2021) toprakta karbon sekestrasyonunu sağlayarak topraktan CO₂ salınımlarını azaltmaktadır (Yerli ve ark., 2022a). Biyoçar toprakta polisiklik aromatik karbon özelliği göstererek toprakta var olan ve biyoçarın toprağa ilave ettiği karbonu normal bir organik madde ilavesine göre daha uzun bir süre muhafaza etmektedir (Bass ve ark., 2016). Ayrıca biyoçarın süngerimsi yapısı toprakta nem kayıplarını azaltarak toprak nemini daha uzun süre korumasıyla su kullanım etkinliğinin geliştirilmesi açısından da olumlu katkılar sunmaktadır (Ahmed ve ark., 2019).

Tüm bu bilgiler ışığında, bu çalışmada, ahır gübresi ve biyoçarla organik maddesi farklı seviyelerde iyileştirilmiş toprağın temiz su ve arıtılmış atık suyla sulanması koşullarında topraktan CO₂ salınımına ilaveten H₂O salınımı ve toprak nemi ile sıcaklığı toprağın ıslanma-kuruma döngüsü süresince takip edilerek araştırılmıştır. Bu çalışma ahır gübresi ve biyoçar uygulanarak aynı organik madde seviyelerine getirilmiş toprağın temiz su ve arıtılmış atık su ile sulanmasında topraktan CO₂ ve H₂O salınımı ile toprak nemi ve sıcaklığı değerlerinin kıyaslanarak belirlenmesini amaçlamıştır. Çalışmanın hipotezleri ahır gübresi ve biyoçar gibi farklı uygulamalarla aynı organik madde içeriklerine sahip topraklarda CO₂ ve H₂O salınımlarının materyal türüne göre farklılaşacağı, ahır gübresinin CO₂ salınımını biyoçara göre artıracığı ve arıtılmış atık suyla sulama koşullarında biyoçarın CO₂ salınımını ahır gübresine göre sınırlandırabileceği yönündedir.

Materyal ve Metot

Çalışma Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Ziraat Fakültesi Biyosistem Mühendisliğine ait laboratuvarında 13 cm çapında ve 11 cm yüksekliğinde 1,5 litrelik saksılarda yürütülmüştür. Çalışma periyodu süresince laboratuvar ortamının el tipi iklim cihazıyla (HOB0, Campbell Scientific Inc., USA) ölçülen günlük ortalama sıcaklık ve nem değerleri $22,3 \pm 4,8^{\circ}\text{C}$ ve $\%37,6 \pm 6,8$ seviyelerinde olmuştur. Çalışmada saksıların dış ortamdan etki faktörünü en az seviyeye ulaştırmak için saksıların yerleri her gün rastgele olarak değiştirilmiştir.

Çalışma organik maddesi %1,21 olan toprağın organik madde seviyesinin kademeli oranlarda ahır gübresi ve biyoçar ile artırılarak (%1,5, %2,5, %3,5 ve %4,5) farklı sulama suyu kaliteleriyle sulanması (temiz su ve arıtılmış atık su) koşullarında yürütülmüştür. Üç tekerrürlü olarak tesadüfi faktöriyel desende dizayn edilmiş çalışmada toprağa ahır gübresi ve biyoçar uygulanmayan kontrol grubu da dahil edilmiştir. Böylece çalışmada toplam saksı sayısı 54 olmuştur.

Çalışmada belirtilen organik madde seviyelerinin [%1,21 (kontrol) %1,5, %2,5, %3,5 ve %4,5] elde edilebilmesi için toprağa karıştırılacak ahır gübresi ve biyoçar miktarları hesaplanmış, daha sonra homojen bir şekilde toprakla karıştırılmış ve Walkley-Black yöntemine göre (Nelson ve Sommers, 1982) organik madde analizi yapılarak organik madde içeriği teyit edilmiştir. Aynı yöntem çalışmada kullanılan toprağın, ahır gübresinin ve biyoçarın organik madde içeriklerinin belirlenmesi için de kullanılmıştır. Ayrıca toprak, ahır gübresi ve biyoçarın organik madde değerlerinden standart katsayıyla organik karbon içerikleri de elde edilirken (Allen ve ark., 1974), toplam azot değerleri Kjeldahl yönteminin esaslarına göre belirlenmiştir (Bremner ve Mulvaney, 1982). Toprağın, ahır gübresinin ve biyoçarın elektriksel iletkenlik ve pH değerleri ise saturasyon ekstraktında kondüktivimetre ve pH metre kullanılarak tespit edilmiştir (McLean, 1982; Corwin ve Rhoades, 1982). Çalışmada kullanılan toprak, ahır gübresi ve biyoçara ilişkin tüm bu analiz sonucu değerler Çizelge 1’de verilmiştir.

Bouyoucos hidrometre yöntemine göre tekstürü (Gee ve Bauder, 1986) kumlu killi tın (kum: %43,8 kil: %30,9 silt: %25,3) olan çalışma toprağı Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Ziraat Fakültesi deneme alanından 0-20 cm toprak derinliğinden alınmıştır. Olgunlaşmış ahır gübresi Van ili Tuşba ilçesinde bulunan bir çiftlikten temin edilirken, saman biyoçarı 400°C 'de piroliz işlemine tabi tutulmuş ve eleme-homojenizasyon işlemi tamamlanmış (Yerli ve ark., 2022b) biyoçar materyali olarak çalışmada kullanılmıştır.

Çalışmada kullanılan temiz su doğrudan çalışma ortamında bulunan Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi'nin

şebeke suyu hattına bağlı musluk suyundan temin edilirken, arıtılmış atık su Van İskele Arıtma Tesisi arıtma prosesi çıkışından her sulamada plastik su tanklarıyla alınarak laboratuvar ortamına getirilmiş ve aynı gün içerisinde bekletilmeden sulamada kullanılmıştır. Çalışma periyodunun ortasında temiz su ve arıtılmış atık suyun elektriksel iletkenlik ve pH değerleri kondüktivimetre ve pH metre ile doğrudan ölçülerek (Ayyıldız, 1983) temiz su ve arıtılmış atık su için sırasıyla 0,413 dS/m ile 8,05 ve 0,846 dS/m ile 7,45 olarak belirlenmiştir. Arıtılmış atık suyun toplam azot içeriği Kjeldahl yöntemine göre (APHA-AWWA-WEF, 1989) 8,81 mg/l olarak belirlenirken, biyolojik ve kimyasal oksijen ihtiyaçları Hach Lange Dr 5000 UV/VIS spektrofotometre cihazında hazır kitler, HACH LT 200 termoreaktör ve HACH LCI 400 küvet testi kullanılarak (HACH, 2005 ve 2010) sırasıyla 21,6 mg/l ve 34,3 mg/l olarak belirlenmiştir.

Çalışmada farklı organik madde seviyelerini oluşturacak şekilde ahır gübresi veya biyoçarla karıştırılmış elenmiş hava kuru su halindeki toprak doğal hacim ağırlığı ($1,31 \text{ g/cm}^3$) korunacak şekilde saksılara aktarılmıştır. Daha sonrasında kontrol uygulamasında belirlenen tarla kapasitesine (saksı kapasitesi) göre tüm saksılar temiz su ile saksı kapasitesine tamamlanmış ve bir ay süre ile inkübasyona bırakılmıştır. Saksı kapasitesi saksıların suya doyurulması ve üzerinin buharlaşmayı önlemek için kapatılması akabinde serbest drenaj koşulları tamamlandığı andaki saksı ağırlığı ve saksı kuru ağırlığı ile toprağın hacim ağırlığı kullanılarak $0,341 \text{ m}^3/\text{m}^3$ olarak belirlenmiştir. İnkübasyon tamamlandıktan sonra tüm saksılar tartılmış ve bu tartıma göre belirlenen eksik nemler temiz suyla saksı kapasitesine tamamlanmıştır. Bu aşamadan sonra her ıslanma-kuruma döngüsü haftada bir tamamlanacak şekilde temiz su ve arıtılmış atık su ile sulamalar gerçekleştirilerek bir ay süresince toplam 4 defa ıslanma-kuruma periyodu tekrarlanmıştır.

Topraktan CO_2 ve H_2O salınımı ile toprak nemi ve sıcaklığı ölçümleri 4 ıslanma-kuruma döngüsü boyunca her gün her saksıdan ölçümler alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla topraktan CO_2 ve H_2O salınımı ölçümleri için dinamik kapalı oda prensibi ile (SRC-1, hacim: 1334 cm^3 , alan: $78,5 \text{ cm}^2$) çalışan EGM-5 kızılötesi gaz analizör cihazı (PPSystems, Stotfold, UK) kullanılırken, aynı cihaza bağlı STP-1 toprak sıcaklık probunun toprağın 5 cm derinliğine batırılmasıyla toprak sıcaklığı ölçülmüştür (Yerli ve ark., 2022a). Toprak nemi ise tarla kapasitesinin (saksı kapasitesi) ve ıslanma-kuruma döngüsündeki eksik nemlerin belirlenmesindeki yaklaşımda olduğu gibi saksıların tartımı yapılarak ve saksı kuru ağırlığı ile toprağın hacim ağırlığı kullanılarak belirlenmiştir (Yerli ve ark., 2022b).

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan toprağın, ahır gübresinin ve biyoçarın özellikleri

Table 1. Properties of the soil, farmyard manure and biochar used in the study

Özellikler	Toprak	Ahır gübresi	Biyoçar
Organik madde (%)	1,21	39,11	58,21
Organik karbon (%)	0,70	22,68	33,76
Toplam Kjeldahl azotu (%)	0,089	1,22	0,223
Elektriksel iletkenlik (dS/m)	0,379	5,410	1,853
pH	8,25	8,07	8,56

Çalışma periyodu süresince elde edilen topraktan CO₂ ve H₂O salınımı ile toprak nemi ve sıcaklığı verilerinin ortalaması toprak organik madde içerikleri, sulama suyu kaliteleri ve üç tekerrür dikkate alınarak SPSS programında değerlendirilmiştir. Bu amaçla varyans analiz kullanılmış ve önemli bulunan ortalamalar Duncan çoklu karşılaştırma testi ile %5 önem seviyesinde sınıflandırılmıştır. Ayrıca biyoçar ve ahır gübresi arasındaki fark t testi ile belirlenirken, topraktan CO₂ ve H₂O salınımı ile toprak nemi ve sıcaklığı değerlerinin birbirleriyle ilişkilerinin belirlenebilmesi amacıyla Pearson korelasyon analizinden yararlanılmıştır.

Bulgular ve Tartışma

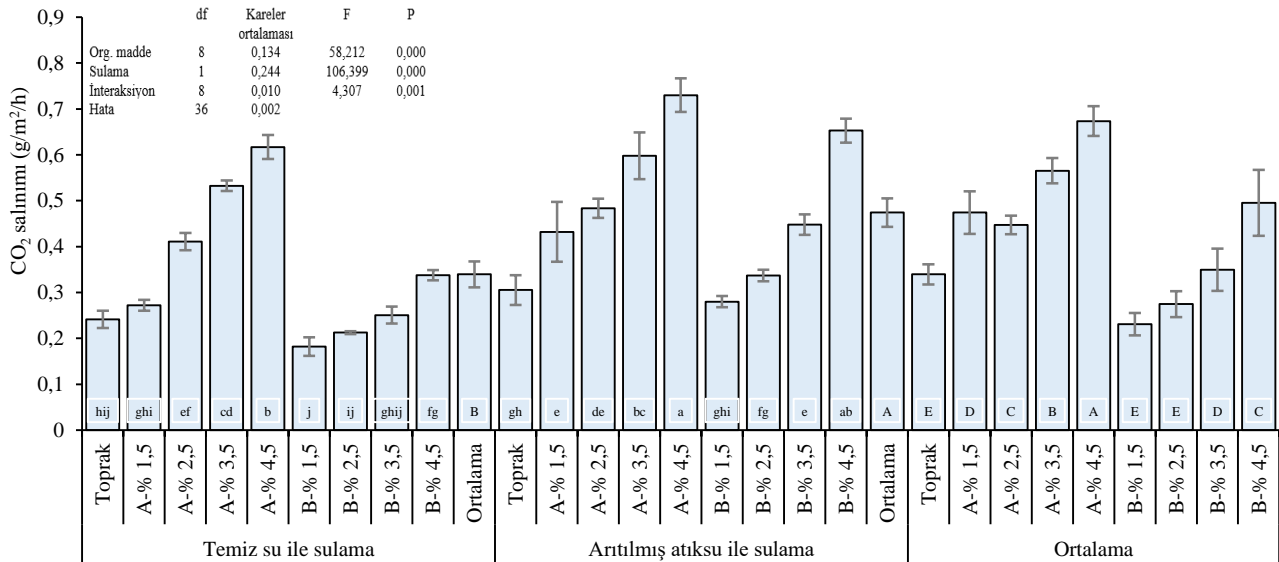
Toprağın değişen organik madde içeriklerinin ve farklı sulama suyu kalitelerinin topraktan CO₂ salınımına etkisi P<0,01 seviyesinde önemli olmuştur (Şekil 1). Ayrıca organik madde içeriği × sulama suyu kalitesi interaksiyonunun topraktan CO₂ salınımına etkisi de P<0,01 seviyesinde önemli bulunmuştur (Şekil 1). Ahır gübresi ile toprağın artan organik madde içerikleri topraktan daha fazla CO₂ salınımıyla sonuçlanmıştır. Ahır gübresinin aksine biyoçarın düşük organik madde oranında salınımı azaltıcı bir etki görülmüş ancak biyoçarın toprağa sağlamış olduğu artan organik madde içeriği ile ahır gübresinden düşük olsa da salınımında artışlar belirlenmiştir. Ancak t testi sonucu hem temiz suyla hem de arıtılmış atık suyla sulama koşullarında biyoçarın CO₂ salınımını azaltıcı etkisinin ahır gübresine göre etkin olduğunu göstermiştir (P<0,01). Ayrıca arıtılmış atık suyla sulamada topraktan CO₂ salınımı temiz suyla sulamaya göre daha fazla seviyede gerçekleşmiştir.

Toprağın organik maddesi içerisinde oluşan karbonu gösteren toprak organik karbonu oksijenle birleşerek

topraktan CO₂ salınımına neden olmaktadır (Yerli ve ark., 2022b). Böylece bu durum ahır gübresi ve biyoçar uygulamaları ile toprağın artan organik madde içeriklerinin daha fazla salınımına neden olmasını açıklayabilir. Toprakta artan organik karbon daha fazla mikrobiyal aktiviteye ve dolayısıyla organik karbonun oksidasyonu ile daha fazla CO₂ salınımına neden olabilir (Altıkat ve ark. 2018). Yerli ve ark. (2022a) toprakta artan organik madde/karbonla beraber topraktan CO₂ salınımının da arttığını ve aralarında önemli ilişki olduğunu belirtmişlerdir.

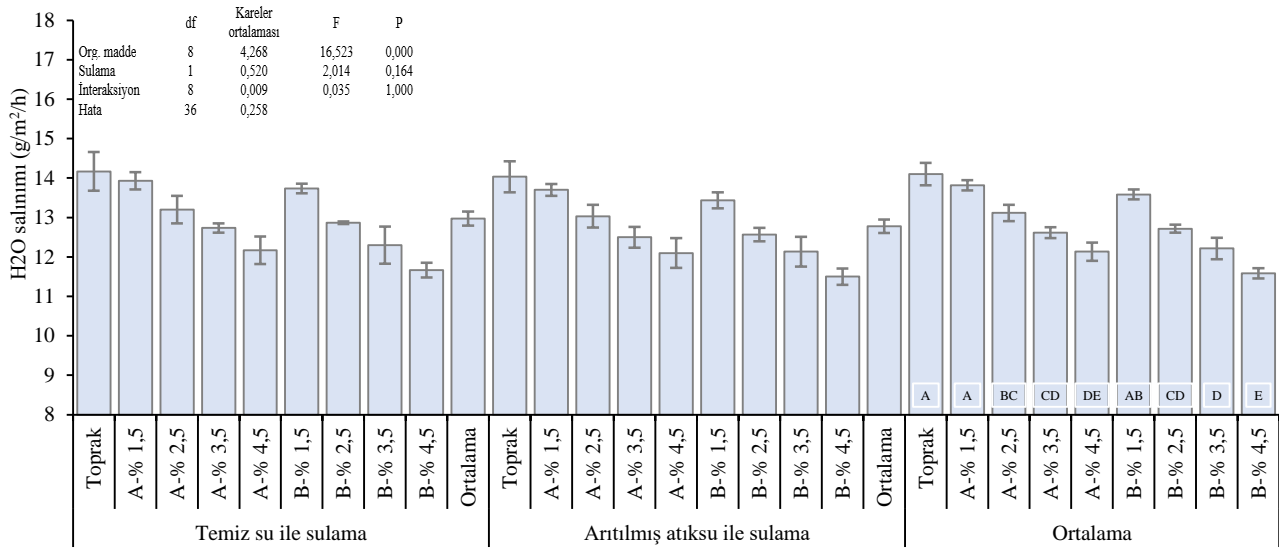
Gübrelemeyle toprakta artan organik karbon, salınım gerçekleştiren toprak mikroorganizmaları için bir kaynak olduğundan önemli seviyede CO₂ salınımıyla sonuçlanmaktadır (Rao ve Pathak, 1996). Toprağa uygulanan ahır gübresinin toprağa sağlamış olduğu organik karbonunun toprak mikrobiyal popülasyonu tarafından hızlı tüketimiyle daha kısa zamanda daha fazla CO₂ salınımına neden olduğunu Mahmoodabadi ve Heydarpour (2014) tarafından ifade edilmiştir. Benzer şekilde Altıkat ve ark. (2018) da ahır gübresi uygulamasının topraktan CO₂ salınımını kontrol uygulamasına göre %38 seviyesine kadar arttırdığını belirtmişlerdir. Farklı bir çalışmada toprağa sağlanan daha fazla ahır gübresinin daha fazla CO₂ salınımı ile sonuçlandığı belirlenmiştir (Ozlu ve Kumar, 2018). Bu durum daha fazla karbonun mikrobiyal faaliyetlerin aktivitesinde enerji kaynağı olarak kullanılması (Dubinsky ve ark., 2010) ve bunun sonucunda da CO₂ salınımı olarak ortaya çıkmasıyla açıklanabilir.

Ahır gübresine göre biyoçarın CO₂ salınımını azaltıcı etkisi biyoçarın stabil özellik gösteren inatçı karbon içeriği ile açıklanabilir. Ayrıca biyoçarın polisiklik aromatik karbon özelliği toprakta karbonun daha uzun süre mineralize olmadan korunumunu sürdürmektedir (Bass ve ark., 2016).



Şekil 1. Farklı su kaynakları ile sulama koşullarında organik madde içeriği ahır gübresi ve biyoçar ile geliştirilmiş topraktan ortalama CO₂ salınımı (A: ahır gübresi, B: biyoçar, % 1,5, % 2,5, % 3,5 ve % 4,5: ahır gübresi ve biyoçar ile toprağa sağlanan organik madde seviyeleri, P<0,01)

Figure 1. The mean CO₂ emission from a soil with improved organic matter content with farmyard manure and biochar under the irrigation conditions with different water sources (A: farmyard manure, B: biochar, 1.5%, 2.5%, 3.5% and 4.5%: organic matter levels provided to soil by farmyard manure and biochar, P<0.01)



Şekil 2. Farklı su kaynakları ile sulama koşullarında organik madde içeriği ahır gübresi ve biyoçar ile geliştirilmiş topraktan ortalama H₂O salınımı (A: ahır gübresi, B: biyoçar, % 1,5, % 2,5, % 3,5 ve % 4,5: ahır gübresi ve biyoçar ile toprağa sağlanan organik madde seviyeleri, P<0,01)

Figure 2. The mean H₂O emission from a soil with improved organic matter content with farmyard manure and biochar under the irrigation conditions with different water sources (A: farmyard manure, B: biochar, 1.5%, 2.5%, 3.5% and 4.5%: organic matter levels provided to soil by farmyard manure and biochar, P<0.01)

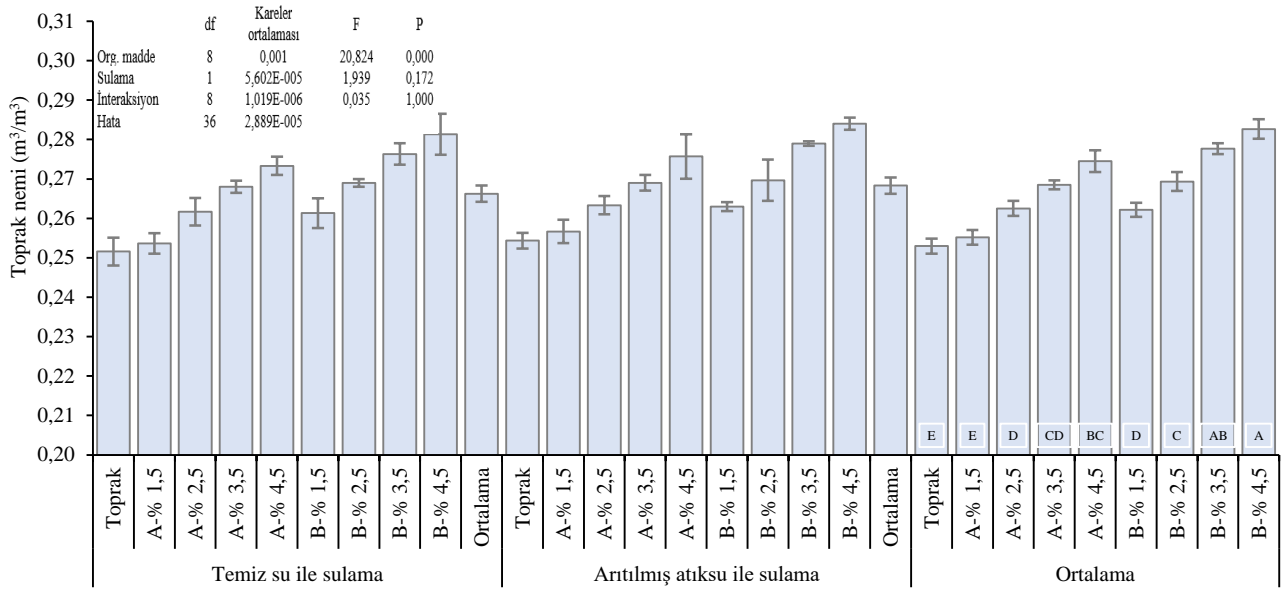
Toprağa ilave edilen biyoçar diğer organik madde katkılarına göre toprakta yüzyıllarca karbon havuzunu sağlayabilir özelliktedir (Laird, 2008). Bu durum biyoçarın biyolojik bozunmaya karşı göstermiş olduğu dirençle doğrudan ilişkilidir. Ligno selülozik biyokütle atıklarının yüksek sıcaklıklarda pirolizi sonucu aktifleştirilmiş bir kömür materyali olarak ortaya çıkan biyoçar içermiş olduğu karbonun mikroorganizmalar tarafından kullanımını sınırlayarak hem toprağa karbon sağlayıcı hem de toprakta CO₂'yi absorbe eden bir toprak düzenleyici olarak görev almaktadır (Jung ve ark., 2019). Ayrıca biyoçar süngerimsi bir yapı karakteristiği göstermektedir. Bu yapı topraktaki karbonu bünyesine hapsedebilir bir özellik göstererek topraktan CO₂ salınımlarını azaltmaktadır (Ahmed ve ark., 2019). Bu süngerimsi yapı topraktan salınan CO₂'yi bünyesinde hapsederek topraktan dışarıya çıkışını da sınırlıyor olabilir. Ayrıca biyoçarın toprak gözenekliliğini artırması ve bu gözeneklerde toprak organik karbonunu oksidasyona uğratmadan koruması (Lehmann ve ark., 2021) biyoçar uygulamaları altından azalan CO₂ salınımlarının farklı bir açıklaması olabilir. Yerli ve ark. (2022b) farklı ham madde içeriklerine sahip biyoçarların topraktan salınım azaltıcı etkisini inceledikleri çalışmada, biyoçarın kontrol uygulamasına göre topraktan CO₂ salınımlarını %13 ile %82 aralığında azalttığını ifade etmişlerdir. Benzer şekilde Cao ve ark. (2022) da biyoçarın ortalama olarak %70 seviyesinde topraktan CO₂ salınımlarını azaltıcı bir etki gösterdiğine dikkat çekmişlerdir.

Arıtılmış atık su ile sulama beklenen bir etki olarak temiz su ile sulamaya göre topraktan CO₂ salınımlarını arttırmıştır. Bu durum arıtılmış atık su ile sulamada arıtılmış atık suyun biyolojik ve kimyasal oksijen içerikleriyle açıklanabilir. Lahlou ve ark. (2022) atık suyun yüksek besleyici etkisine bağlı olarak toprağa sağlamış olduğu besin element içeriğiyle topraktan CO₂ salınımlarını artırdığını belirtmişlerdir. Benzer şekilde Fernández-Luqueño ve ark. (2010) da arıtılmış atık su ile

sulamada topraktan CO₂ salınımının arttığını ve bu artışın temiz su ile sulamaya göre 2,5 kat daha fazla olduğunu ifade etmişlerdir.

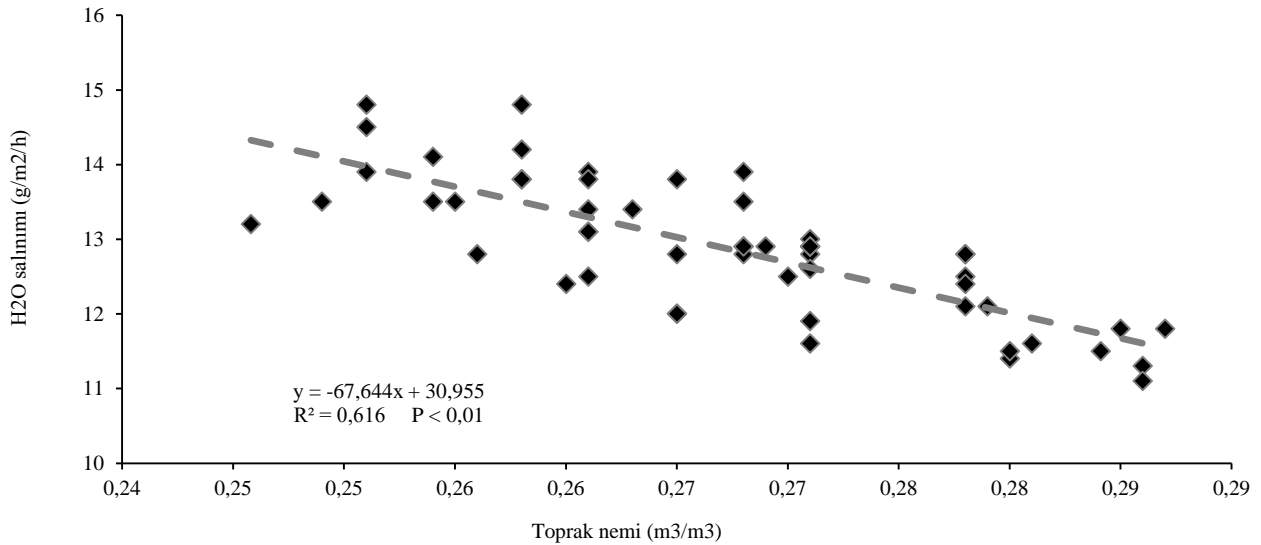
Toprağın değişen organik madde içeriklerinin topraktan H₂O salınımına ve toprak nemine etkisi P<0,01 seviyesinde önemli olurken, farklı sulama suyu kalitelerinin etkisi önemsiz bulunmuştur (Şekil 2 ve 3). Ahır gübresi ve biyoçar ile toprağın artan organik madde içerikleri topraktan daha az H₂O salınımı ve daha fazla toprak nemine sonuçlanmıştır. Ahır gübresinin aksine biyoçarın salınımı azaltıcı ve toprak nemini koruyucu özelliği daha etkili olmuştur. T testi sonucu da hem temiz suyla hem de arıtılmış atık suyla sulama koşullarında biyoçarın H₂O salınımını azaltıcı ve toprak nemini koruyucu etkisinin ahır gübresine göre daha etkili olduğunu doğrulamıştır (P<0,01).

Toprakta artan organik madde seviyesinin toprakta nem korunumunu sağlayarak böylece topraktan H₂O salınımını azalttığı düşünülmektedir. Bu çalışmada belirlenmiş olan toprak nemi ve topraktan H₂O salınımı arasındaki önemli (P<0,01) negatif doğrusal ilişki de bu durumu desteklemektedir (Şekil 4). Benzer bir ilişki Yerli ve ark. (2022a) tarafından da belirtilmiş ve toprakta artan organik maddenin yüksek nem tutma kabiliyetiyle topraktan H₂O salınımlarını azaltıcı bir etki gösterdiğine dikkat çekilmiştir. Organik madde toprağın gözenek oluşumuna katkı sağlayarak toprakta daha fazla suyun tutulmasına böylece topraktan daha az H₂O salınımına neden olmaktadır (Libohova ve ark., 2018). Emerson ve McGarry (2003) toprakta artan organik maddenin ≤ 30 µm çapına sahip su tutulumunu sağlayıcı gözeneklerin artışına katkı sunarak toprak nem düzenini iyileştirdiğini bildirmişlerdir. Benzer durum Yang ve ark. (2014) tarafından da belirlenmiş ve toprağa karıştırılan organik maddenin toprak gözenek boyutu ve dağılımını düzenleyerek toprağın nem kaybını ve topraktan H₂O salınımını azalttığı vurgulanmıştır.



Şekil 3. Farklı su kaynakları ile sulama koşullarında organik madde içeriği ahır gübresi ve biyoçar ile geliştirilmiş toprakta ortalama toprak nemini (A: ahır gübresi, B: biyoçar, % 1,5, % 2,5, % 3,5 ve % 4,5: ahır gübresi ve biyoçar ile toprağa sağlanan organik madde seviyeleri, $P < 0,01$)

Figure 3. The mean soil moisture in a soil with improved organic matter content with farmyard manure and biochar under the irrigation conditions with different water sources (A: farmyard manure, B: biochar, 1.5%, 2.5%, 3.5% and 4.5%: organic matter levels provided to soil by farmyard manure and biochar, $P < 0.01$)



Şekil 4. Toprak nemini ve topraktan H_2O salınımı arasındaki ilişki
Figure 4. Relationship between soil moisture and H_2O release from soil

Ahır gübresinin topraktan H_2O salınımını azaltıcı ve toprak nemini koruyucu etkisi ahır gübresinin toprağa sağlamış olduğu organik madde içeriği ile açıklanabilirken, biyoçarın etkisi organik madde içeriğine ilaveten biyoçarın gözenekli yapısı ve süngerimsi karakteristiğine bağlı olarak ifade edilebilir. Yüzer alan ve gözenek hacmi büyük olan biyoçar toprağın hacim ağırlığını azaltarak (Abel ve ark., 2013) ve toprakta toplam porozite artışına ve yüzey alan genişlemesine katkı sunarak toprak neminin daha etkin kullanılmasına ve nemin toprakta saklanmasına katkı sunmaktadır (Obia ve ark., 2016). Biyoçar gözenekli yapısı sayesinde toprakta başta makro ve mikro porların hacim veya sayısını artırarak toprağın partikül gözenekliliğini geliştirmesiyle toprakta daha fazla suyun

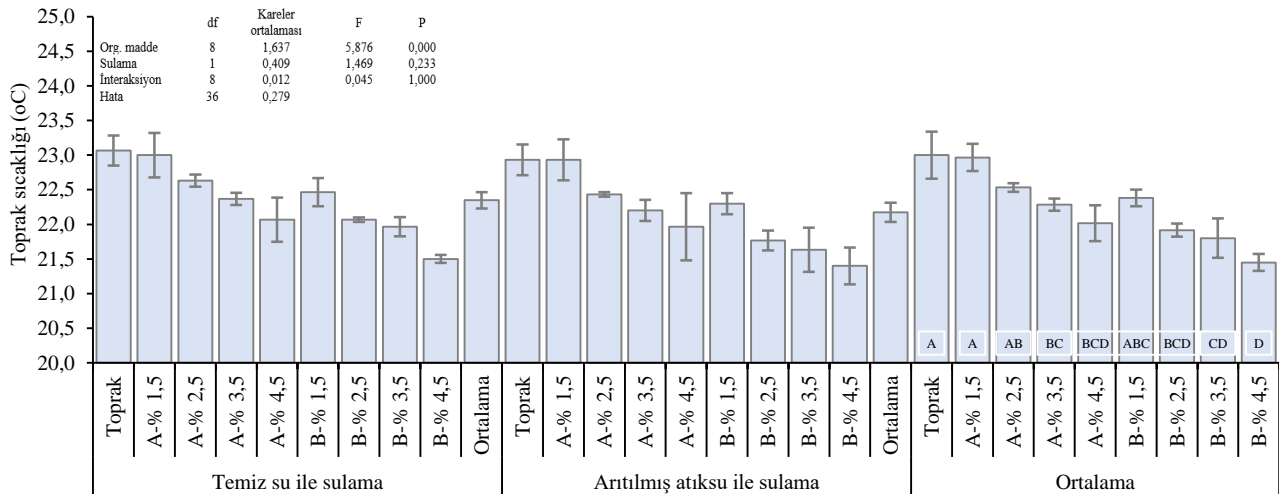
depolanmasına imkan sağlamaktadır (Wang ve ark., 2019). Ayrıca Ahmed ve ark. (2019) biyoçarın toprak nemini koruyucu ve topraktan H_2O salınımını azaltıcı etkisinin biyoçarın gözenekli yapısına ilaveten süngerimsi yapı karakteristiği göstererek toprak nemini bu yapıda depolamasıyla ilişkili olduğunu ifade etmişlerdir. Yerli ve ark. (2022b) da biyoçarın toprak nemini koruyucu ve topraktan H_2O salınımını azaltıcı etkisinin biyoçarın süngerimsi yapısından kaynaklandığını belirtmişler ve aynı çalışmada farklı biyoçar materyallerinin kontrol uygulamasına göre topraktan H_2O salınımını %3 ile %8 aralığından azalttığını ve toprak neminin korunmasına %4 ile %10 aralığından katkı sağladığını bildirmişlerdir.

Toprağın değişen organik madde içeriklerinin toprak sıcaklığına etkisi $P<0,01$ seviyesinde önemli olurken, farklı sulama suyu kalitelerinin etkisi önemsiz bulunmuştur (Şekil 5). Ahır gübresi ve biyoçar ile toprağın artan organik madde içerikleri daha düşük toprak sıcaklığıyla sonuçlanmıştır. Ahır gübresinin aksine artan biyoçar dozunun toprak sıcaklığını azaltıcı etkisi daha fazla olmuştur. T testi sonucu da hem temiz suyla hem de arıtılmış atık suyla sulama koşullarında biyoçarın toprak sıcaklığını azaltıcı etkisinin ahır gübresine göre daha etkili olduğunu desteklemiştir ($P<0,01$).

Ahır gübresi ve biyoçarla toprağın artan organik madde içeriklerinde ve ahır gübresine göre biyoçar uygulamalarında daha düşük toprak sıcaklığının nedeni daha yüksek nem içeriğine (Şekil 3) bağlı olarak açıklanabilir. Toprakta daha fazla nemin oluşturduğu soğutucu bir etkiyle toprağın ısınmasının azaldığı düşünülmektedir. Bu çalışmada belirlenmiş olan toprak nemi ve toprak sıcaklığı arasındaki önemli ($P<0,01$) negatif doğrusal ilişki de bu durumu desteklemektedir (Şekil 6). Zhang ve ark. (2019) toprağa giren yağmur sularının 5 cm toprak derinliğinde $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'den daha büyük bir seviyede toprak sıcaklığında düşüşe neden olduğunu ifade etmişlerdir. Toprak nemi doğrudan toprağın termal özelliklerini etkileyerek zemin yüzeyindeki enerji dağılımını değiştirmesiyle daha düşük toprak sıcaklıklarına neden olabilir (Nwadiabia ve ark., 2010). Liu ve ark. (2008) toprağın ısı iletkenliğinin ve ısı kapasitesinin toprakta artan nem ile nemi bir güç fonksiyonu sonucunda toprak sıcaklığını anlık olarak artırıp maksimum değere ulaştırdıktan sonra azalttığını bildirmişlerdir. Ancak Roxy ve ark. (2014) toprak sıcaklığı ve toprak nemi arasındaki ilişkinin toprak bünyesi, toprak organik maddesi, gözeneklilik ve biyolojik aktivite gibi birçok toprak özelliği ve sıcaklık, net radyasyon, duyulur ve gizli ısı akışları gibi birçok toprak termal aktivite özellikleri tarafından da yönetildiğine dikkat çekmişlerdir. Bu çalışmanın bulguları ile benzer şekilde Zhang ve ark.

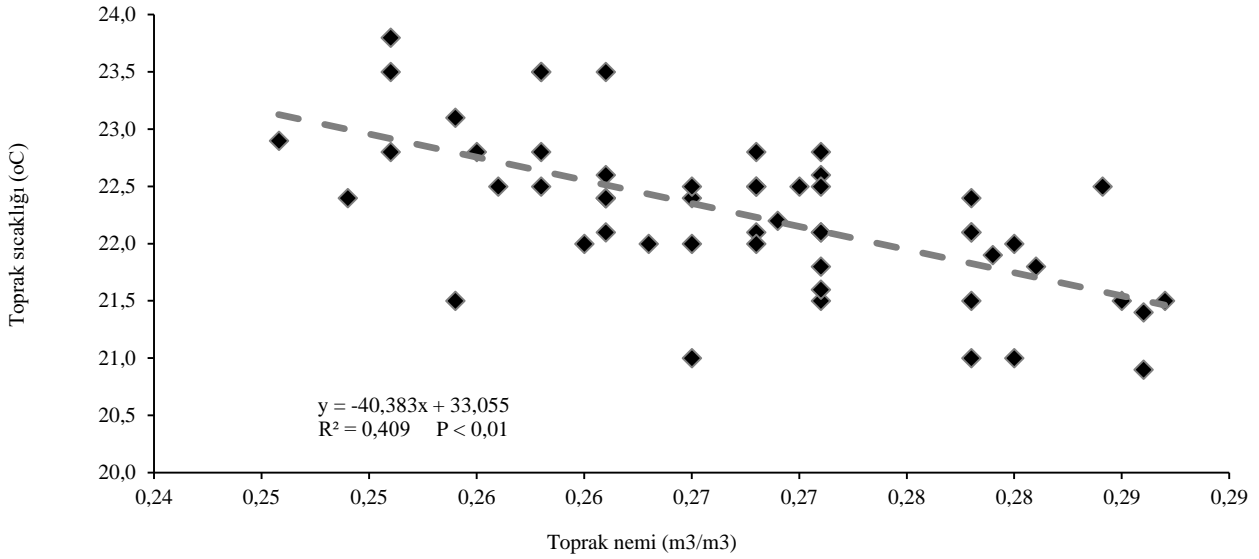
(2013) da toprağa farklı seviyelerde uygulanan biyoçarın toprak sıcaklığında %3,5 ile %7,5 aralığında azalmaya neden olduğunu ve bu azalmanın toprağın toprak termal iletkenliğindeki değişimlerden kaynaklandığını ifade etmişlerdir.

Toprakta CO_2 salınımında toprak nemi ve toprak sıcaklığı bütünsel bir süreçtir. Uygun toprak nemi ve sıcaklığı toprak mikrobiyal popülasyonunun aktif kalma sürecini ve hızını artırarak daha fazla mineralizasyon ile topraktan CO_2 salınımının artmasını sağlamaktadır (French ve ark., 2009). Toprakta CO_2 salınımlarını yöneten toprağın karbon dinamikleri olası toprak nemi ve toprak sıcaklığı değişimlerinden önemli seviyede etkilenerek uygun nem ve sıcaklık koşullarında daha fazla ayrışma gösterirler (Fang ve ark., 2022). Yetersiz toprak nemi mikrobiyal popülasyonun faaliyetlerini zayıflatarak mineralizasyon görevlerini yerine getirmesini engellemektedir (Yerli ve ark., 2020a). Kuru bir toprağa nem kazandırılması zincirleme bir etkiyle sırasıyla mikroorganizma faaliyetlerini, oksidasyon proseslerini ve topraktan CO_2 salınımlarını tetikleyerek artırmaktadır (Lamparter ve ark., 2009). Bu çalışmada da belirlenmiş olan topraktan CO_2 salınımı ve toprak nemi arasındaki önemli ($P<0,01$) pozitif doğrusal ilişki artan nem koşullarında topraktan CO_2 salınımı artışını desteklemektedir (Şekil 7). Ancak bu çalışmada topraktan CO_2 salınımının toprak sıcaklığıyla ilişkisi önemsiz olmuştur. Bu durum artan nem koşullarında nemi toprakta serinletici bir etki oluşturarak toprak sıcaklığını azaltması (Şekil 3 ve 5) ve buna bağlı olarak toprak nemi ile toprak sıcaklığının negatif doğrusal ilişki göstermesiyle açıklanabilir (Şekil 6). Ayrıca toprak sıcaklığının CO_2 salınımları üzerindeki etkisinin toprak neminden bağımsız değerlendirildiği koşullarda, toprak sıcaklığındaki değişimlerin toprak mikrobiyal aktivitesi ve dolayısıyla topraktan CO_2 salınımları üzerine etkisinden bahsedebilmek mümkündür.

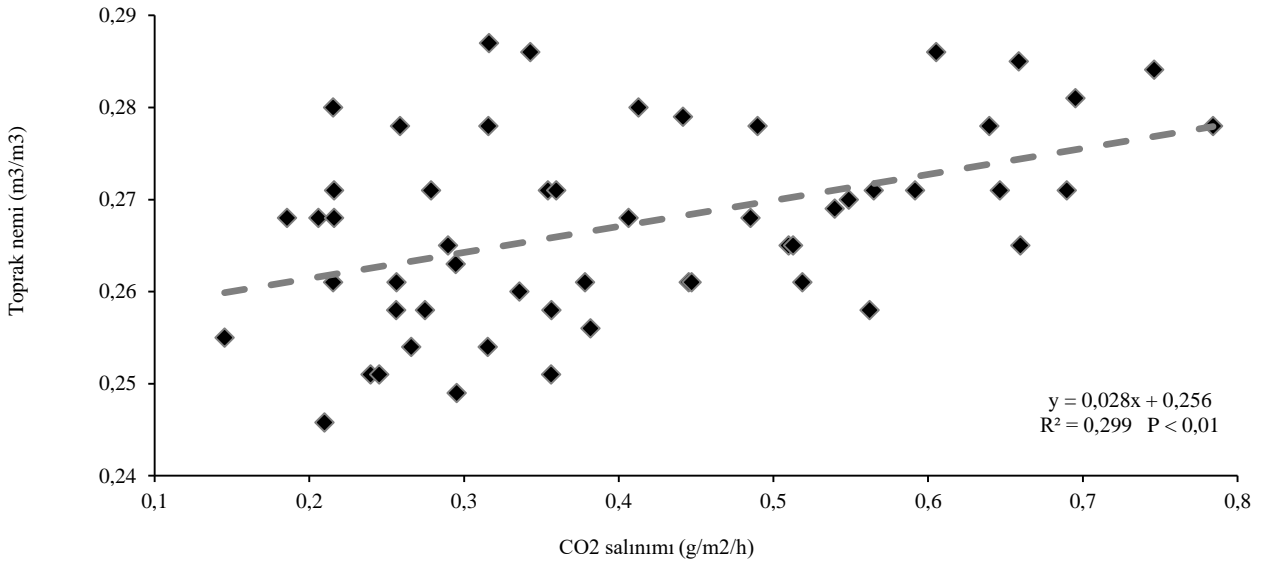


Şekil 5. Farklı su kaynakları ile sulama koşullarında organik madde içeriği ahır gübresi ve biyoçar ile geliştirilmiş toprakta ortalama toprak sıcaklığı (A: ahır gübresi, B: biyoçar, % 1,5, % 2,5, % 3,5 ve % 4,5: ahır gübresi ve biyoçar ile toprağa sağlanan organik madde seviyeleri, $P<0,01$)

Figure 5. The mean soil temperature in a soil with improved organic matter content with farmyard manure and biochar under the irrigation conditions with different water sources (A: farmyard manure, B: biochar, 1.5%, 2.5%, 3.5% and 4.5%: organic matter levels provided to soil by farmyard manure and biochar, $P<0.01$)



Şekil 6. Toprak nemli ve toprak sıcaklığı arasındaki ilişki
Figure 6. Relationship between soil moisture and soil temperature



Şekil 7. CO₂ salınımı ve toprak nemli arasındaki ilişki
Figure 7. Relationship between CO₂ release and soil moisture

Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmanın sonuçları; ahır gübresi ve biyoçarla toprağın artan organik madde içeriklerinde ve arıtılmış atık su ile sulama koşullarında topraktan CO₂ salınımının arttığını ancak bu artışın biyoçar uygulamasında daha düşük seviyede olduğunu ve biyoçarla organik madde katkısının düşük seviyelerinin (%1,5 ve %2,5) kontrol uygulaması ile benzer salınım değerlerini gösterdiğini ve ayrıca arıtılmış atık suyla sulama ve toprağın organik madde içeriğinin artırıldığı koşullarda da biyoçarın ahır gübresine göre önemli bir küresel ısınma risk kaynağı olan topraktan CO₂ salınımını azaltma yönünde daha etkili olduğunu göstermiştir. Ayrıca sulama suyu kaynağı türü topraktan H₂O salınımı ile toprak nemli ve sıcaklığı üzerinde önemsiz etkilerle sonuçlanırken, ahır gübresi ve biyoçar ile toprağın artan organik madde içerikleri topraktan H₂O salınımını azaltma ve böylece toprak nemini koruma yönünden etkili olmuş ve bu etkinlikte biyoçar uygulaması daha fazla ön plana çıkmıştır. Bunlara ek olarak toprak neminin daha fazla olduğu uygulamalar daha düşük toprak sıcaklığıyla

sonuçlanmış ve topraktan CO₂ salınımı toprak nemli ile önemli pozitif doğrusal ilişki gösterirken toprak sıcaklığıyla olan ilişkisi önemsiz olmuştur.

Sonuç olarak, toprak organik madde içeriğinin iyileştirilmesi amacıyla ahır gübresi yerine topraktan CO₂ ve H₂O salınımını azaltıcı ve toprak nemini koruyucu özellikleriyle biyoçarın tercih edilmesinin hem tarımsal hem de çevresel sürdürülebilirliğe önemli katkıların olacağı sonuçlarına ulaşılmış ve temiz su kaynaklarının korunması için suyun en büyük tüketicisi olan tarım sektöründe sulamaların arıtılmış atık su ile yapılmasının bir zorunluluk olduğu günümüz koşullarında arıtılmış atık suyun topraktan CO₂ salınımını artırıcı etkisine karşı biyoçarın kullanımı önerilebilir bir sonuç olarak bulunmuştur. Ancak, arıtılmış atık suyla sulamanın yapıldığı koşullarda biyoçarın salınım azaltıcı özelliği konusunda daha fazla çalışma yapılması bu kaynakların tarımda kullanımı ile ilgili kararların alınmasında önemli olacaktır. Ayrıca ahır gübresinin mineralizasyonu

sonucunda açığa çıkan besin elementlerinin toprak verimliliği açısından önemli olduğu dikkate alındığında ahır gübresiyle biyoçar karışımı konusunda da çalışmaların yürütülmesi önerilebilir sonuçlar arasında bulunmuştur.

Kaynaklar

- Abel S, Peters A, Trinks S, Schonsky H, Facklam M, Wessolek G. 2013. Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. *Geoderma*, 202: 183-191. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.03.003>
- Ahmed R, Li Y, Mao L, Xu C, Lin W, Ahmed S, Ahmed W. 2019. Biochar effects on mineral nitrogen leaching, moisture content, and evapotranspiration after 15N urea fertilization for vegetable crop. *Agronomy*, 9(6): 331. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060331>
- Allen SE, Grimshaw HM, Parkinson JA, Quarmby C. 1974. Chemical analysis of ecological materials. Blackwell Scientific Publications. ISBN 9780632003211.
- Altıkat S, Küçükdemir HK, Altıkat A. 2018. Effects of wheel traffic and farmyard manure applications on soil CO₂ emission and soil oxygen content. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 42: 288-297. <https://doi.org/10.3906/tar-1709-79>
- APHA-AWWA-WPCF. 1989. Standard methods for examination of water and wastewater. Available from: https://www.techstreet.com/standards/standard-methods-for-the-examination-of-water-and-wastewater-23rdedition?gclid=EAIaIQobChMI8cO8p8K24AIVFojVCh3qvwXIEAAYASAAEgLc_vD_BwE&si_d=goog&product_id=1974889 [Erişim tarihi: 18.10.2022]
- Assefa S, Tadesse S. 2019. The principal role of organic fertilizer on soil properties and agricultural productivity-a review. *Agricultural Research & Technology Open Access Journal*, 22(2): 556192.
- Ayyıldız M. 1983. Sulama suyu kalitesi ve tuzluluk problemleri. Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, Ankara.
- Bass AM, Bird MI, Kay G, Muirhead B. 2016. Soil properties, greenhouse gas emissions and crop yield under compost, biochar and co-composted biochar in two tropical agronomic systems. *Science of the Total Environment*, 550: 459-470. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.143>
- Bremner JM, Mulvaney CS. 1982. Nitrogen-Total 1. Methods of Soil Analysis, Part 2, Physical and Mineralogical Methods. In: Klute A (editör). *Agronomy Society of America and Soil Science Society America*.
- Cao L, Zhang X, Xu Y, Xiang W, Wang R, Ding F, Hong P, Gao B. 2022. Straw and wood based biochar for CO₂ capture: Adsorption performance and governing mechanisms. *Separation and Purification Technology*, 287: 120592. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120592>
- Corwin DL, Rhoades JD. 1984. Measurement of inverted electrical conductivity profiles using electromagnetic induction. *Soil Science Society of America Journal*, 48(2): 288-291. <https://doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800020011x>
- Dubinsky EA, Silver WL, Firestone MK. 2010. Tropical forest soil microbial communities couple iron and carbon biogeochemistry. *Ecology*, 91(9): 2604-2612. <https://doi.org/10.1890/09-1365.1>
- Emerson WW, McGarry D. 2003. Organic carbon and soil porosity. *Soil Research*, 41(1):107-118. <https://doi.org/10.1071/SR01064>
- Fang X, Zhu YL, Liu JD, Lin XP, Sun HZ, Tang XH, Hu YL, Huang YP, Yi ZG. 2022. Effects of moisture and temperature on soil organic carbon decomposition along a vegetation restoration gradient of subtropical China. *Forests*, 13(4): 578. <https://doi.org/10.3390/f13040578>
- FAO, 2007. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Coping with water scarcity-Challenge of the twenty-first century, World water day. Available from: <http://www.fao.org/3/a-aq444e.pdf> [Erişim tarihi: 20.01.2023]
- FAO, 2012. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Coping with water scarcity-An action framework for agriculture and food security. Available from: <http://www.fao.org/3/a-i3015e.pdf> [Erişim tarihi: 20.01.2023]
- Fernández-Luqueño F, Reyes-Varela V, Cervantes-Santiago F, Gómez-Juárez C, Santillán-Arias A, Dendooven L. 2010. Emissions of carbon dioxide, methane and nitrous oxide from soil receiving urban wastewater for maize (*Zea mays* L.) cultivation. *Plant and Soil*, 331(1): 203-215. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0246-0>
- French S, Levy-Booth D, Samarajeeva A, Shannon KE, Smith J, Trevors JT. 2009. Elevated temperatures and carbon dioxide concentrations: effects on selected microbial activities in temperate agricultural soils. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 25: 1887-1900. <https://doi.org/10.1007/s11274-009-0107-2>
- Gee GW, Bauder JW. 1986. Particle-Size Analysis. Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods. In: Klute A (editör). *Agronomy Society of America and Soil Science Society America*.
- HACH, 2005. DR 5000 spectrometer procedures manuel. Available from: <http://tr.hach.com/quick.Searchdownloadsearch.jsa?keywords=kullan%C4%B1> [Erişim tarihi: 17.10.2018]
- HACH, 2010. Hach bodtrak II. Available from: <http://tr.hach.com/bod-trak-ii-aksuarlar-ile-birlikte-respirometrikboi-ayrilar/productdownloads> [Erişim tarihi: 17.10.2018]
- Jones DL, Murphy DV, Khalid M, Ahmad W, Edwards-Jones G, DeLuca TH. 2011. Short-term biochar-induced increase in soil CO₂ release is both biotically and abiotically mediated. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(8): 1723-1731. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.018>
- Jung, S., Park, Y. K., & Kwon, E. E. (2019). Strategic use of biochar for CO₂ capture and sequestration. *Journal of CO₂ Utilization*, 32: 128-139. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.04.012>
- Kudal M, Müftüoğlu NM. 2014. Kentsel atık su ile sulanan topraklarda bazı verimlilik özelliklerinin incelenmesi. *Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 2(1): 77-81.
- Lahlou FZ, Mackey HR, Al-Ansari T. 2022. Role of wastewater in achieving carbon and water neutral agricultural production. *Journal of Cleaner Production*, 130706. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130706>
- Laird DA. 2008. The charcoal vision: a win-win-win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, while improving soil and water quality. *Agronomy Journal*, 100(1): 178-181. <https://doi.org/10.2134/agronj2007.0161>
- Lamparter A, Bachmann J, Goebel MO, Woche SK. 2009. Carbon mineralization soil: impact of wetting-drying, aggregation and water repellency. *Geoderma*, 150: 324-333. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.02.014>
- Lehmann J, Cowie A, Masiello CA, Kammann C, Woolf D, Amonette JE, Cayuela ML, Camps-Arbestain M, Whitman T. 2021. Biochar in climate change mitigation. *Nature Geoscience*, 14(12): 883-892. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00852-8>
- Libohova Z, Seybold C, Wysocki D, Wills S, Schoeneberger P, Williams C, Lindbo D, Stott D, Owens PR. 2018. Reevaluating the effects of soil organic matter and other properties on available water-holding capacity using the National Cooperative Soil Survey Characterization Database. *Journal of Soil and Water Conservation*, 73(4): 411-421. <https://doi.org/10.2489/jswc.73.4.411>

- Liu, H, Wang B, Fu C. 2008. Relationships between surface albedo, soil thermal parameters and soil moisture in the semi-arid area of Tongyu, northeastern China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 25: 757-764. <https://doi.org/10.1007/s00376-008-0757-2>
- Mahmoodabadi M, Heydarpour E. 2014. Sequestration of organic carbon influenced by the application of straw residue and farmyard manure in two different soils. *International Agrophysics*, 28(2): 169-176. <https://doi.org/10.2478/intag-2014-0005>
- Mancosu N, Snyder RL, Kyriakakis G, Spano D. 2015. Water Scarcity and Future Challenges for Food Production. *Water*, 7: 975-992. <https://doi.org/10.3390/w7030975>
- McLean EO, 1982. Soil pH and Lime Requirement. *Methods of Soil Analysis. Methods of Soil Analysis, Part 2, Physical and Mineralogical Methods*. In: Klute A (editör). Agronomy Society of America and Soil Science Society America.
- Nelson DW, Sommers LE. 1982. Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter. *Methods of Soil Analysis, Part 2, Physical and Mineralogical Methods*. In: Klute A (editör). Agronomy Society of America and Soil Science Society America.
- Nwadiabia NO, Ugwu EI, Aduloju KA. 2010. Theoretical analysis of the influence of the thermal diffusivity of clay soil on the thermal energy distribution in clay soil of Abakaliki, Nigeria. *Research J. of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 2(3): 216-221.
- Obia A, Mulder J, Martinsen V, Cornelissen G, Børresen T. 2016. In situ effects of biochar on aggregation, water retention and porosity in light-textured tropical soils. *Soil and Tillage Research*, 155: 35-44. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.08.002>
- Ozlu E, Kumar S. 2018. Response of soil organic carbon, pH, electrical conductivity, and water stable aggregates to long-term annual manure and inorganic fertilizer. *Soil Science Society of America J.*, 82(5): 1243-1251. <https://doi.org/10.2136/sssaj2018.02.0082>
- Qin Y, Horvath A. 2020. Use of alternative water sources in irrigation: potential scales, costs, and environmental impacts in California. *Environmental Research Communications*, 2(5): 055003. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ab915e>
- Rao DLN, Pathak H. 1996. Ameliorative influence of organic matter on biological activity of salt-affected soils. *Arid Land Research and Management*, 10(4): 311-319. <https://doi.org/10.1080/15324989609381446>
- Roxy MS, Sumithranand VB, Renuka G. 2014. Estimation of soil moisture and its effect on soil thermal characteristics at Astronomical Observatory, Thiruvananthapuram, Kerala. *J. of Earth System Sci.*, 123: 1793-1807. <https://doi.org/10.1007/s12040-014-0509-x>
- Taban S, Turan MA, Katkat AV. 2013. Tarımda organik madde ve tavuk gübresi. *Tavukçuluk Araştırma Dergisi*, 10(1): 9-13.
- Topçu P, Yavuz Ö, Tolunay A. 2022. Sürdürülebilir toprak yönetiminde toprak organik karbonunun önemi. *Turkish Journal of Forest Science*, 6(2): 604-614. <https://doi.org/10.32328/turkjforsci.1039785>
- Ungureanu N, Vlăduț V, Voicu G. 2020. Water scarcity and wastewater reuse in crop irrigation. *Sustainability*, 12(21): 9055. <https://doi.org/10.3390/su12219055>
- Wang D, Li C, Parikh SJ, Scow KM. 2019. Impact of biochar on water retention of two agricultural soils-A multi-scale analysis. *Geoderma*, 340: 185-191. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.012>
- Yang F, Zhang GL, Yang JL, Li DC, Zhao YG, Liu F, Yang R, Yang F. 2014. Organic matter controls of soil water retention in an alpine grassland and its significance for hydrological processes. *Journal of Hydrology*, 519: 3086-3093. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.054>
- Yerli C, Cakmakci T, Sahin U. 2022a. CO₂ Emission from soil containing different organic manures in wetting-drying conditions and the relationships of CO₂ emission with moisture, temperature and H₂O emission. *Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpaşa University*, 39(3): 161-168. <https://doi.org/10.55507/gopzfd.1187899>
- Yerli C, Cakmakci T, Sahin U. 2022b. CO₂ emissions and their changes with H₂O emissions, soil moisture, and temperature during the wetting-drying process of the soil mixed with different biochar materials. *Journal of Water and Climate Change*, 13(12): 4273-4282. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.293>
- Zhang Q, Wang Y, Wu Y, Wang X, Du Z, Liu X, Song J. 2013. Effects of biochar amendment on soil thermal conductivity, reflectance, and temperature. *Soil Science Society of America Journal*, 77(5): 1478-1487. <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0180>
- Zhang S, Meurey C, Calvet JC. 2019. Identification of soil-cooling rains in southern France from soil temperature and soil moisture observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(7): 5005-5020. <https://doi.org/10.5194/acp-19-5005-2019>
- Zhang Z, Dong X, Wang S, Pu X. 2020. Benefits of organic manure combined with biochar amendments to cotton root growth and yield under continuous cropping systems Xinjiang, China. *Scientific Reports*, 10: 4718. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61118-8>