



Tatlı Sorgum (*Sorghum Bicolor* (L)) Biyokütlesinin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi ile Çevresel Etkilerinin Belirlenmesi

Ömer Eren^{1*}, Hasan Huseyin Öztürk²

^{1*} Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Hatay, Türkiye, (ORCID: 0000-0003-4578-3187), oeren@mku.edu.tr
² Çukurova Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makineleri ve Teknolojileri Müh. Bölümü, Adana, Türkiye (ORCID: 0000-0001-6904-5539), hhozturk@cu.edu.tr

(İlk Geliş Tarihi Aralık 2020 ve Kabul Tarihi Ocak 2021)

(DOI: 10.31590/ejosat.852286)

ATIF/REFERENCE: Eren, Ö. & Öztürk H. H. (2021). Tatlı Sorgum (*Sorghum Bicolor* (L)) Biyokütlesinin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi ile Çevresel Etkilerinin Belirlenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (22), 195-203.

Öz

Enerji bitkileri, fosil yakıt tüketimini ve sera gazı emisyonlarını azaltma da ümit vadeden biyoyakıtların hammaddelerindedir. Kuraklığa dayanıklı olan ve marjinal alanlarda kısa bir sürede yetiştirilebilen tatlı sorgum bu enerji bitkilerinden biridir. Bu çalışmada, tatlı sorgum (*Sorghum Bicolor* (L)) biyokütlesi üretimindeki çevresel etkiler belirlenmiştir. Tatlı sorgum üretiminin çevresel etkileri yaşam döngüsü değerlendirmesiyle değerlendirilmiştir. Çevresel etki kategorileri, CML 2001 metodolojisine göre on kategoriye ayrılmıştır. Sonuçta, tatlı sorgum üretiminde ortalama kuru biyokütle verimi 9135 kg ha⁻¹ ve biyokütlenin kalorifik (ısı) değeri ise 18.53 MJ kg⁻¹ olarak saptanmıştır. Biyokütle üretimi amacıyla tatlı sorgum yetiştirilmesinin yaşam döngüsü etki değerlendirmesine göre, en fazla çevresel etkinin % 51.03 oranıyla, deniz canlılarının ekotoksitesine sebep olduğu belirlenmiştir. Yaşam döngüsü yorumlanmasına göre de, % 80.02 oranıyla yerel etkiye sebep olduğunda saptanmıştır. Ayrıca, küresel ısınma değeri de, 0.114 kg CO₂-eş kg^{biyokütle}⁻¹ (1043.51 kg CO₂-eş ha⁻¹) olarak hesaplanmıştır. Yetiştiricilikteki gübre uygulamalarının çevresel etkileri oldukça olumsuz etkilediği de tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda belirlenen bu bulgulara bağlı olarak, mevcut üretimin iyileştirilmesine yönelik çözüm önerileri de verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Biyokütle, Energy crops, Kalorifik (Isı) Değer, Tatlı sorgum, Yaşam döngüsü değerlendirme

Determination of Environmental Impacts with Life Cycle Assessment of Sweet Sorghum (*Sorghum Bicolor* (L)) Biomass

Abstract

Energy crops are among the raw materials of biofuels that are promising to reduce fossil fuel consumption and greenhouse gas emissions. Sweet sorghum, which is drought resistant and can be grown in marginal areas in a short time, is one of these energy crops. In this study, environmental effects on sweet sorghum (*Sorghum Bicolor* (L)) biomass production were determined. Environmental effects of sweet sorghum production were evaluated by life cycle assessment. Environmental impact categories are divided into ten categories according to the CML 2001 methodology. As a result, the average dry biomass yield in sweet sorghum production and higher calorific (heating) value of biomass were determined as 9135 kg ha⁻¹ and 18.53 MJ kg⁻¹, respectively. According to the life cycle impact assessment of sweet sorghum cultivation for biomass production, it was determined that the highest environmental impact was 51.03%, causing the marine aquatic ecotoxicity. According to the life cycle interpretation, it has been determined that it causes local effect with a rate of 80.02%. Also, the value of global warming was calculated as 0.114 kg CO₂-eq kg^{biomass}⁻¹ (1043.51 kg CO₂-eq ha⁻¹). It has also been determined that fertilizer applications in breeding have an extremely negative impact on environmental effects. Based on these findings determined because of the study, solution suggestions for improving the current production are also given.

Keywords: Biomass, Enerji bitkileri, Calorific (Heating) Value, Sweet sorghum, Life cycle assessment

* Sorumlu Yazar: oeren@mku.edu.tr

1. Giriş

Türkiye’de son 10 yılda toplam yenilenebilir enerji üretim kapasitesi yaklaşık olarak % 156 oranında artmıştır (IRENA, 2020). Birincil enerji kaynağı içindeki yenilenebilir enerji kaynaklarının payı, IRENA (2017) yılı göstergelerine göre % 13’lere çıkmıştır. Bu yenilenebilir enerji kaynaklarının % 15’ni biyoenerji kaynakları oluşturmaktadır.

Biyoenerji, biyokütle yakıtlardan (biyoyakıt) elde edilen enerjidir. Biyokütle yakıtlar, canlı organizmada bulunan ve C bazlı ürünlerden üretilen organik (biyokütle, bioetanol ve biyogaz) yakıtlardır. Enerji bitkileri, hayvan atıkları ve kentsel katı atıklar biyoyakıtların kaynaklarıdır. Bu yakıtlar, fosil yakıt tüketimini ve sera gazı emisyonlarını azaltma da da ümit vadeden yakıtlardır.

Tatlı sorgum (*Sorghum Bicolor* (L)), C4 metabolizmasına sahip, tek yıllık, hızlı büyüyen bir enerji bitkisidir. Aynı zamanda çok etkili bir kök sistemine sahiptir. Bu kök sistemi sayesinde kuraklığa dayanıklıdır ve su gereksinimi düşüktür (Köppen ve ark, 2009). Enerji bitkisi olmasının yanında, ekmek yapımında, konsantr şurup üretiminde ve yem bitkisi kaynağı olarak da kullanılabilir.

Biyoyakıt üretimi sürdürülebilir olmalıdır; yani çevresel, sosyal, ekonomik ve enerji bakımından uygulanabilir olmalıdır. Biyoyakıtlar, kırsal alanlarda (ve komşu belediyelerde) işleme tesislerinin varlığı nedeniyle sosyoekonomik fayda sağlama potansiyeline de sahiptir, ekonomik dinamizmi teşvik eder, istihdam yaratır ve ayrıca diğer ilgili endüstrileri de etkiler (Gilio ve Moraes, 2016; Moraes ve ark., 2016).

Biyoyakıt kaynağı olan enerji bitkileri, tarımsal üretim sistemlerinde üretilir. Tarımsal üretim sistemlerinde çevresel etkileri azaltmak ve enerji tasarrufu sağlamak amacıyla tarımsal girdilerin kullanımını optimize etmek önemli bir gerekliliktir. Tarımsal üretim sistemlerinde kaynakların etkin kullanımı ve enerji etkinliği ile ilgili çalışmalar da (Mutlu, 2020; Baran ve Gökdoğan, 2020; Karaağaç ve ark., 2019) önem arz etmektedir.

Tarımsal üretimdeki çevresel etkileri azaltabilmek için çevresel etkileri belirlemek gerekir. Bu çevresel etkileri belirlemede tarımsal yaşam döngüsü değerlendirme (YDD) yönteminden faydalanılmaktadır. Tarımsal YDD, toprağın işlenmesinden ürünün hasat edilmesine kadar geçen süreçteki tarımsal üretim sistemindeki girdilerin çevreye etkilerinin, çevresel etki kategorileri bazında belirlenmesi ile ilgili bir yöntemdir. Dünya’da tarımsal YDD ile ilgili ilk çalışmalar, 1993 yılında Weidama tarafından tarımsal YDD ile ilgili seminerler verilerek başlamıştır. 1995-1997 yılları arasında, Avrupa komisyonunun AIR3-CT94-2028 uyumlu eylemi kapsamında, buğday üretiminde uygulanan üç farklı yetiştirme şeklinin (geleneksel, entegre ve organik) çevresel etkilerini birbirleriyle kıyaslayarak belirlemek amacıyla tarımsal YDD yönteminden faydalanmışlardır. Daha sonraları araştırmalar iyi tarım uygulamaları için genişletilerek tarımsal YDD’ler yapılmış ve ülkeler kendi destekledikleri projelerle tarımsal YDD veri tabanları oluşturmuşlardır (Eren, 2011).

Tarımsal ürünlerin üretim sırasında oluşturduğu çevresel etkileri belirlemek amacıyla yapılan bazı tarımsal YDD çalışmalarında; ayçiçeği (Vatsanidou ve ark., 2020), dallı darı (Miller ve ark., 2020), enerji bitkileri (Christoforou ve ark., 2016), mısır (Frank ve ark. ,2020; Zhang ve ark., 2018; Boone ve ark.,

2016) ve yulaf (Vatsanidou ve ark., 2020) ürünlerinin üretimi sırasında oluşturdukları çevresel etkileri belirlemişlerdir.

Bu çalışma, tatlı sorgum (*Sorghum Bicolor* (L)) biyokütlesi üretimi sırasında oluşan çevresel etkileri belirlemek amacıyla yapılmıştır. Çevresel etkileri belirlemede tarımsal YDD yönteminden faydalanılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

2.1.1. Deneme Arazisi

Denemeler, Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi Araştırma ve Uygulama Çiftliği (Adana) arazisinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Deneme arazisi

Akdeniz ikliminin hâkim olduğu deneme alanında, deneme dönemlerindeki (mayıs, haziran, temmuz, ağustos ve eylül ayları) toplam yağış miktarı 83 mm ve ortalama sıcaklık ise yaklaşık 26.8 °C civarında olmuştur. Tatlı sorgumun yetiştirilmesi süresince 20-35 °C sıcaklık isteği ve 500-600 mm su ihtiyacı olmaktadır (Guiying ve ark., 2003). Deneme süresince, deneme alanındaki mevsimsel sıcaklık bitkinin ihtiyaç duyduğu sıcaklığı karşılamıştır. Ama, yeterli kadar yağış olmadığından bitkinin su ihtiyacı karşılanamamış ve yetiştirme süresince sulamaya ihtiyaç duyulmuştur. Deneme arazisinin toprak analizi sonuçlarına göre; toprağın pH değeri (7.32), bitkinin yetiştirilebilmesi için gerekli olan ideal pH değeri (5.0-8.5) arasında bir değer olarak belirlenmiştir. Toprağın P₂O₅ içeriği 2.56 kg da⁻¹ olarak ölçülmüş ve yetersiz olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla üretim sırasında P₂O₅ gübresi atılmıştır. Toprağın K₂O içeriği 106.30 kg da⁻¹ olarak ölçülmüş ve toprak için yeterli görülmüş, üretim sırasında K₂O gübresinin atılmasına gerek duyulmamıştır.

2.1.2. Tatlı Sorgum Üretimi Kültürel Uygulamaları

Tatlı sorgum üretimindeki kültürel uygulamalar ve bakım işleri aşağıdaki gibi gerçekleştirilmiştir.

Toprak işleme: Toprak, 20-25 cm derinlikte pullukla sürülmüş ve daha sonra toprakta oluşan kesekler goble diskaroyla parçalanmıştır. Son olarak ise toprak tapanla düzeltilmiştir.

Ekim: Mayıs ayının ilk haftasında, sıra arası 45 cm ve sıra üzeri 20 cm alınarak, pnömatik ekim makinasıyla 4-5 cm derinliğe birim alana (ha) 5 kg olacak şekilde ekim yapılmıştır.

Bakım: Ekim sırasında pnomatik ekim makinasının gübreleme ünitesiyle birim alana (ha) 200 kg olacak şekilde toprak altına 20-20-0 (DAP) gübresi atılmıştır. Daha sonra, ara çapa işlemi sırasında gübreli ara çapa makinasıyla birim alana (ha) 400 kg olacak şekilde AN (% 33) gübresi de atılmıştır. Ekimden 45 gün sonra ve bitkinin boyu 35 cm olduğunda, ara çapa makinasıyla çapalama yapılarak yabancı ot mücadelesi yapılmıştır. Bitkiler, 1 m boylanıncaya kadar 7 gün arayla ve 1 m boylandıktan sonra hasat gününe kadar 12 gün arayla yağmurlama ünitesiyle birim alana (ha) toplam 680 m³ sulama yapılmıştır. .

Hasat: Eylül ayının ilk haftasında ve bitki tam olum dönemine (tohumun nem içeriği % 8-12) geldiğinde, tamburlu çayır biçme makinasıyla bitki hasat edilmiştir. Anız boyu 5 cm bırakılmıştır.

2.2. Metod

2.2.1. Tatlı Sorgum Biyokütlesinin Isıl Değerinin Belirlenmesi

Biyokütle, bitki hasat edildikten ve tohumlar salkımlarından ayrıldıktan sonra arta kalan kuru ürün olarak tanımlanmıştır. Biyokütle, sap, yaprak ve tohumuz salkımlardan oluşmuştur. Biyokütle miktarı da kuru biyokütlenin birim alan (ha) başına kütlesi olarak hesaplanmıştır.

Biyokütlenin üst ısıl değeri (HHV (MJ kg_{KM}⁻¹)), Yin (2011)'in bulmuş olduğu eşitlik 1'e göre hesaplanmıştır.

$$HHV = 0.2949 \times C + 0.8250 \times H \quad (1)$$

Burada;

- C : Kuru biyokütlenin karbon içeriği (%),
H : Kuru biyokütlenin hidrojen içeriğidir (%).

C ve H içerikleri, TÜBİTAK-MAM Enerji Enstitüsünde yaptırılan elementel analiz sonuçlarına göre belirlenmiştir.

McKendry (2002)'ye göre biyoyakıt olarak kullanılan kuru biyokütlerde hiç nem bulunmadığı varsayılmaktadır. Bu nedenle kuru biyokütle için hesaplanan HHV değerleri, alt ısıl değere (LHV) eşit kabul edilmektedir. Bu varsayımdan yola çıkarak, tatlı sorgum biyokütlesinin HHV değeri LHV değerine eşit olarak alınmıştır.

2.2.2. Çevresel Etkilerin Belirlenmesi

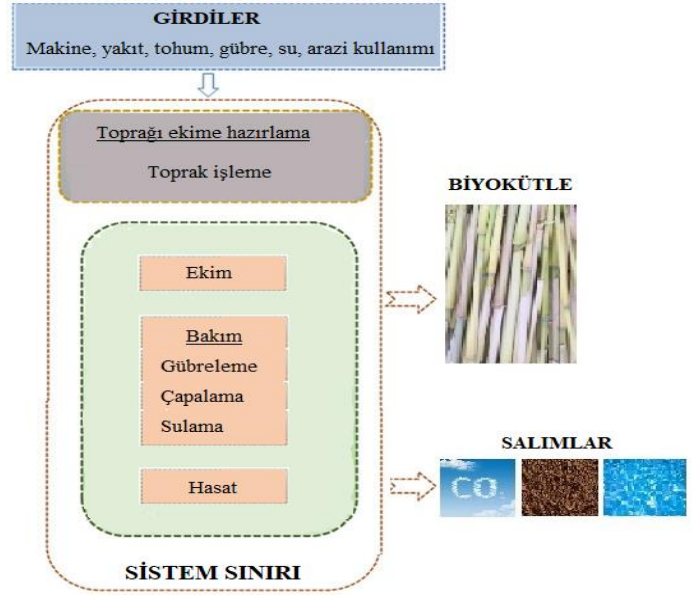
Tatlı sorgum biyokütlesi üretiminde oluşan çevresel etkilerin belirlenmesinde tarımsal yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) yönteminden yararlanılmıştır. Tarımsal YDD, tarımsal aktivitelerin çevresel etkilerini belirlemek amacıyla, YDD yönteminin beşikten mezara kadar (cradle to grave) değil de sadece beşikten kapıya kadar (cradle to gate) uygulanmasıdır. Elde edilen tarımsal ürün, başka bir ürünün hammaddesi olduğu için YDD ürün elde edilmesine kadar yapılır.

Tarımsal YDD, TSE 14040 standartına göre amaç ve kapsam tanımı, envanter analizi, etki değerlendirme ve yorumlama olmak üzere dört ana adımda gerçekleştirilmiştir.

i. Amaç ve Kapsam Tanımı

Tarımsal YDD'ye göre, Adana'da tatlı sorgum biyokütlesi üretim sisteminde üretim sırasındaki kültürel uygulamalar ve bakım işlemlerinden dolayı oluşan çevresel etkilerin belirlenmesi amacıyla bu çalışma yapılmıştır. Çalışmanın sonuçları ile çiftçiler, ziraat odaları, akademisyenler ve yerel politikacılar biyokütle üretimiyle ilgili olumlu ya da olumsuz çevresel etkiler, kültürel uygulamalar ve bakım işlemlerinin optimize edilebilecek

kısımları hakkında bilgilendirilmiş olacaktır. Belirlenen amaç doğrultusunda, Şekil 2'deki bir sistem sınırı tanımlanmıştır.



Şekil 2. Üretim sisteminin sistem sınırları

Tanımlanan sistem sınırına göre, kullanılan tarım makinaları, yakıt kullanımı, gübre kullanımı, tohum, sulamada su kullanımı girdi olarak kabul edilmiştir. Çıktı olarak da hasat edilen ürünün biyokütlesi ve emisyonlar (havaya, toprağa ve suya) kabul edilmiştir.

Fonksiyonel birim, değerlendirmedeki etki kategorilerini ve tüm verileri normalleştirerek referans sağlayan bir birimdir. Tarımsal YDD'lerde farklı fonksiyonel birimler seçilebilir. Tarımsal YDD ile ilgili birçok literatür çalışması incelendiğinde, fonksiyonel birim olarak birim alanın (1 ha) kabul edildiği saptanmıştır. Bu çalışmada, fonksiyonel birim olarak, tatlı sorgum yetiştirme alanı (1 ha) ve kuru biyokütle miktarı (1 kg_{biyokütle}) kabul edilmiştir.

ii. Yaşam Döngüsü Envanter Analizi (YDEA)

Üretim sisteminin YDEA'nın yapılabilmesi için aşağıda verilmiş olan genel varsayımlarda bulunulmuştur.

- Deneme arazisindeki tarla eğimsiz ve ekilebilir bir arazidir.
- Deneme arazisinde sulu tarım yapılmaktadır. Ama drenaj sistemi bulunmamaktadır.
- Deneme arazisinin toprağının kil içeriği % 51 (killi bünyeli) ve organik madde (humus) içeriği % 1.5 olarak analiz edilmiştir.
- Bitkinin potansiyel kök derinliği, El Bassam (2010)'a göre 190 cm kabul edilmiştir.
- Deneme arazisinin, tarla toprağının aşınım faktörü (K faktörü) orta düzeyde olduğu için göz ardı edilmiştir.
- Denemeler sırasınca mineral gübreleme (20-20-0 DAP ve % 33 AN) yapılmıştır.
- Toprak erozyonunu ve amonyak kayıplarını önlemek için makine kullanılmamıştır.

Daha sonra, üretim sisteminin envanterleri çıkarılmıştır. Üretim sistemindeki kütle dengesi envanter (üretim sırasında kullandığımız tarımsal girdiler ve çıktılar) değerleri Tablo 1'de ve kullanılmış olan makinaların/traktörlerin envanter verileri ise Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Kütle Dengesi Envanteri

Girdiler	Birim	Hektar başına miktar (birim ha ⁻¹)
Arazi kullanımı	ha	1.00
Dizel Yakıt	l	92.60
Gübre (Amonyum Nitrat %33)	kg	400.00
Gübre (20-20-0)	kg	200.00
Su	m ³	680.00
Tohum	kg	5.00
Çıktılar		
Biyokütle	kg	9135.00

Tablo 2. Tarım Makinaları ve Traktör Envanterleri

Makina	Kütle (kg)	Ekonomik Ömür (h)	İş Genişliği (m)	Yakıt Tüketimi (L ha ⁻¹)
<u>New Holland (95 BG) Traktör</u>	3770	10000	-	-
Pulluk	1220	2000	1.10	36.90
Goble Diskaro	2220	2000	2.10	17.40
Tapan	1300	2000	3.50	7.00
Ekim Makinası	1900	1500	2.10	13.30
<u>John Deere (53 BG) Traktör</u>	2300	10000	-	-
Ara Çapa Makinası	720	2000	2.10	8.00
Tamburlu Çayır Biçme Makinası	370	2000	1.65	10.00

iii. Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi (YDED)

YDEA'den elde edilen sonuçlara göre, biyokütlenin üretim sisteminin çevresel etkilerinin değerlendirilmesinde, ISO 14040 Standartlarına uygun olarak 2001 yılında Leiden Üniversitesi Çevre Bilimleri Merkezindeki birkaç bilim insanı tarafından geliştirilen CML 2001 metodolojisinden yararlanılmıştır.

Potansiyel çevresel etkiler (karakterizasyon değerleri), CML 2001 metodolojisi baz alınarak SimaPro 7 yazılımıyla hesaplanmıştır. Bu CML 2001 metodolojisi, küresel ısınma potansiyeline ek olarak abiyotik bozunma, asitleşme, ötrofikasyon, ozon tabakasının incilmesi, fotokimyasal oksidasyon, insan zehirlenmesi, kara canlılarının ekotoksitesitesi, temiz su canlılarının ekotoksitesitesi ve deniz canlılarının ekotoksitesitesinden oluşan 9 adet daha çevresel etki kategorileri içermektedir.

Karakterizasyon değerleri hesaplandıktan sonra yazılımda normleştirme yapılarak normleştirme değerleri hesaplanmıştır. Etki kategorilerini kendi aralarında değerlendirebilmek için normleştirme yapılmıştır.

iv. Yorumlama

Normleştirme değerlerine göre, tatlı sorgum biyokütlesi üretim sisteminin küresel, bölgesel ve yerel ölçekte etkileri değerlendirilerek yorumlama yapılmıştır.

Küresel etkisini değerlendirebilmek için küresel ısınma potansiyeli, ozon tabakasının incilmesi ve abiyotik bozunma değerlerinden, bölgesel etkilerini değerlendirebilmek için fotokimyasal oksidasyon ve asitleşme değerleri ve yerel etkilerini değerlendirebilmek için ise ötrofikasyon ve insan/canlıların zehirlenmeleri dikkate alınmıştır.

3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

3.1. Isıl Değer

TÜBİTAK-MAM'da yaptırılan elementel analizi sonuçlarına göre, tatlı sorgum biyokütlesinin karbon (C), oksijen (O₂), Hidrojen (H), azot (N) ve kükürt (S) içerikleri sırasıyla % 47.68, % 40.03, % 5.42, % 0.60 ve % 0.15 olarak belirlenmiştir. Kısa analiz sonuçlarına göre; uçucu madde, bağlı karbon, nem ve kül miktarları sırasıyla % 70.54, % 16.72, % 7.06 ve % 5.69 olarak saptanmıştır

Bu elementel analiz sonuçlarına göre, % 47.68 oran ile C biyoküttelede en fazla bulunan element olarak saptanmıştır. Biyokütteledeki C içeriği, daha önce 86 adet farklı biyokütle (Vassilev ve ark., 2010) için bulunan (% 42-71) değerler arasında ve katı fosil yakıtların (% 56-87) değerlerinin oldukça altında tespit edilmiştir. Biyokütlesindeki C içeriği nedeniyle tatlı sorgum biyokütlesi, sera gazı salımlarının yoğunluğunu ve biyoyakıtın ısıl değerini, yüksek C içeriğine sahip biyoyakıtlara göre azaltıcı bir etkiye sahiptir. Bu sonucun yanında, % 0.15 oran ile S biyoküttelede en az bulunan element olarak saptanmıştır. Biyokütteledeki S içeriği, daha önce 86 adet farklı biyokütle (Vassilev ve ark., 2010) için bulunan (% 0.01-2.3) değerleri arasında ve katı fosil yakıtların (% 0.2-9.8) değerlerinin altında tespit edilmiştir. Biyokütlesindeki S içeriği nedeniyle tatlı sorgum biyokütlesi, biyoyakıtın yanmasından dolayı oluşan asitleşme gibi çevreyi kirletme etkisine, yüksek S içeriğine sahip biyoyakıtlara göre azaltıcı bir etkiye de sahiptir.

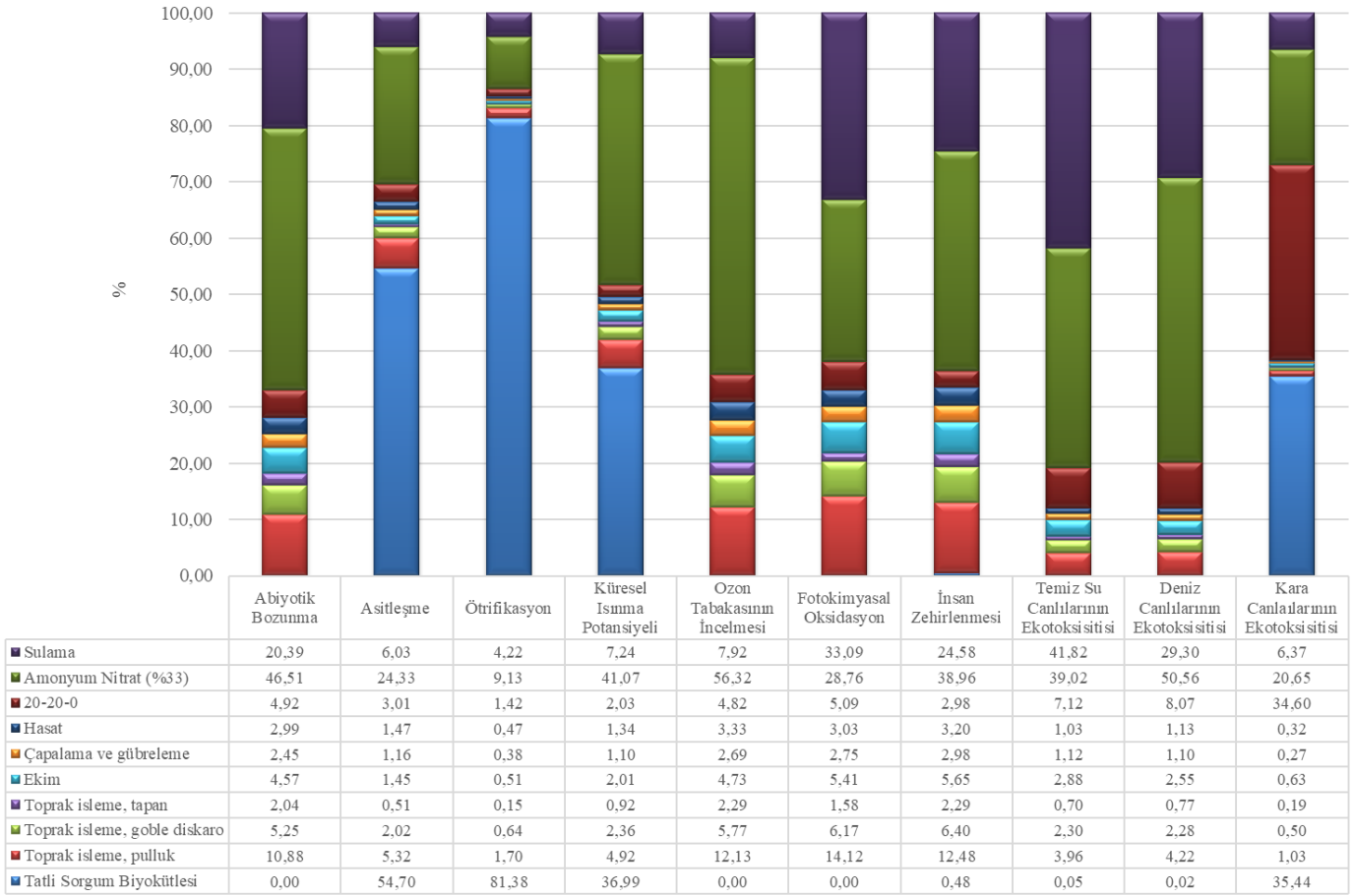
Biyokütlenin HHV değeri 18.53 MJ kg⁻¹ olarak hesaplanmıştır. Biyokütlenin HHV'si kuru ürüne göre belirlendiği için LHV değeri de 18.53 MJ kg⁻¹ kabul edilmiştir. Literatürde (Yin, 2011), buğday samanının, mısır sapının ve pamuğun HHV değerlerinin sırasıyla, 17.99 MJ kg⁻¹, 17.93 MJ kg⁻¹ ve 17.40 MJ kg⁻¹ olarak hesaplandıkları saptanmıştır. Tatlı sorgum biyokütlesinin HHV değeri (18.53 MJ kg⁻¹), literatürdeki değerlerden yüksek olarak tespit edilmiştir.

3.2. Potansiyel Çevresel Etkiler

3.2.1. Karakterizasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Tablo 3. Tatlı sorgum biyokütlesi üretiminin yaşam döngüsü etki göstergeleri (üretilen ürünün fonksiyonel birimi başına)

Etki Kategorileri	BİRİM	Birim kg ^{biyokütle} ⁻¹	Birim ha ⁻¹
Abiyotik Bozunma	kg Sb-eş	0.0003163	2.89
Asitleşme	kg SO ₂ -eş	0.0005456	4.89
Ötrofikasyon	kg PO ₄ -eş	0.0004493	4.10
Küresel ısınma potansiyeli	kg CO ₂ -eş	0.1142321	1043.51
Ozon tabakasının incelməsi	kg CFC11-eş	0.0000000561	0.000051
Fotokimyasal oksidasyon	kg C ₂ H ₄ -eş	0.00000503	0.05
İnsan zehirlenmesi		0.0289497	264.46
Temiz su canlılarının ekotoksitesitesi	kg 1.4-DCB-eş	0.0085001	77.65
Deniz canlılarının ekotoksitesitesi		0.0071871	65.65
Kara canlılarının ekotoksitesitesi		0.00001257	0.12



Şekil 3. Karakterizasyon değerlerinin %'lik olarak karşılaştırılması

Tatlı sorgum biyokütlesi üretiminin etki değerlendirmesi sonucunda, Tablo 3'teki karakterizasyon değerleri ve Şekil 3'teki grafik elde edilmiştir. Tablo 3 ve Şekil 3 birlikte değerlendirildiğinde;

- Abiyotik bozunma etkisi, 0.0003163 kg Sb-eş kg^{biyokütle}⁻¹ olarak hesaplanmış ve en fazla sebep olan kültürel uygulama AN gübre uygulaması (% 46.51) olarak saptanmıştır.

- Asitleşme etkisi, 0.0005456 kg SO₂-eş kg^{biyokütle}⁻¹ olarak hesaplanmış ve bu etkiye en fazla sebep olanın tatlı sorgum biyokütlesi (% 54.70) olduğu belirlenmiştir. Bunun sebebi, bitkinin biyolojik aktiviteleri yani dokularının küçük toprak

canlıları tarafından ayrıştırılması sonucunda üretilen organik asitlerin toprakta artmasıdır. Wang ve ark. (2014) ise bu değeri, 0.00927 kg SO₂-eş kg^{biyokütle}⁻¹ olarak hesaplamışlardır.

- Ötrofikasyon etkisi, 0.0004493 kg PO₄-eş kg^{biyokütle}⁻¹ olarak hesaplanmış ve bu etkiye en fazla sebep olanın tatlı sorgum biyokütlesi (% 81.38) olduğu belirlenmiştir. Bunun sebebi, bitkinin yetiştirilmesi sırasında gübrelemeden kaynaklı nitratı bünyesinde fazla tutamadığı ve tutulmayan nitratın toprağa süzülmesinden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Wang ve ark. (2014) ise bu değeri, 0.0035 kg PO₄-eş kg^{biyokütle}⁻¹ olarak hesaplamışlardır.

- Küresel ısınma potansiyeli, 0.1142321 kg CO₂-eş kg_{biyokütle}⁻¹ olarak hesaplanmış ve en fazla sebep olan kültürel uygulama AN gübre uygulaması (% 41.07) olarak saptanmıştır. Wang ve ark. (2014) ise bu değeri, 0.517 kg CO₂-eş kg_{biyokütle}⁻¹ olarak hesaplamışlardır.

- Ozon tabakasının incilmesi, 0.0000000561 kg CFC11-eş kg_{biyokütle}⁻¹ olarak hesaplanmış ve en fazla sebep olan kültürel uygulama AN gübre uygulaması (% 56.32) olarak saptanmıştır.

- Fotokimyasal oksidasyon, 0.00000503 kg C₂H₄-eş kg_{biyokütle}⁻¹ olarak hesaplanmış ve en fazla sebep olan kültürel uygulama sulama (% 33.09) olarak saptanmıştır. Wang ve ark. (2014) ise bu değeri, 0.00005474 kg C₂H₄-eş kg_{biyokütle}⁻¹ olarak hesaplamışlardır.

- İnsan zehirlenmesi, 0.0289497 kg 1.4-DCB-eş kg_{biyokütle}⁻¹ olarak hesaplanmış ve en fazla sebep olan kültürel uygulama AN gübre uygulaması (% 38.96) olarak saptanmıştır. Wang ve ark. (2014) ise bu değeri, 0.04085 kg 1.4-DCB-eş kg_{biyokütle}⁻¹ olarak hesaplamışlardır.

- Temiz su canlılarının ekotoksitesitesi, 0.0085001 kg 1.4-DCB-eş kg_{biyokütle}⁻¹ olarak hesaplanmış ve en fazla sebep olan kültürel uygulama sulama (% 41.82) olarak saptanmıştır. Wang ve ark. (2014) ise bu değeri, 0.023895 kg 1.4-DCB-eş kg_{biyokütle}⁻¹ olarak hesaplamışlardır.

- Deniz canlılarının ekotoksitesitesi, 0.0071871 kg 1.4-DCB-eş kg_{biyokütle}⁻¹ olarak hesaplanmış ve en fazla sebep olan kültürel uygulama AN gübre uygulaması (% 50.36) olarak saptanmıştır. Wang ve ark. (2014) ise bu değeri, 0.45675 kg 1.4-DCB-eş kg_{biyokütle}⁻¹ olarak hesaplamışlardır.

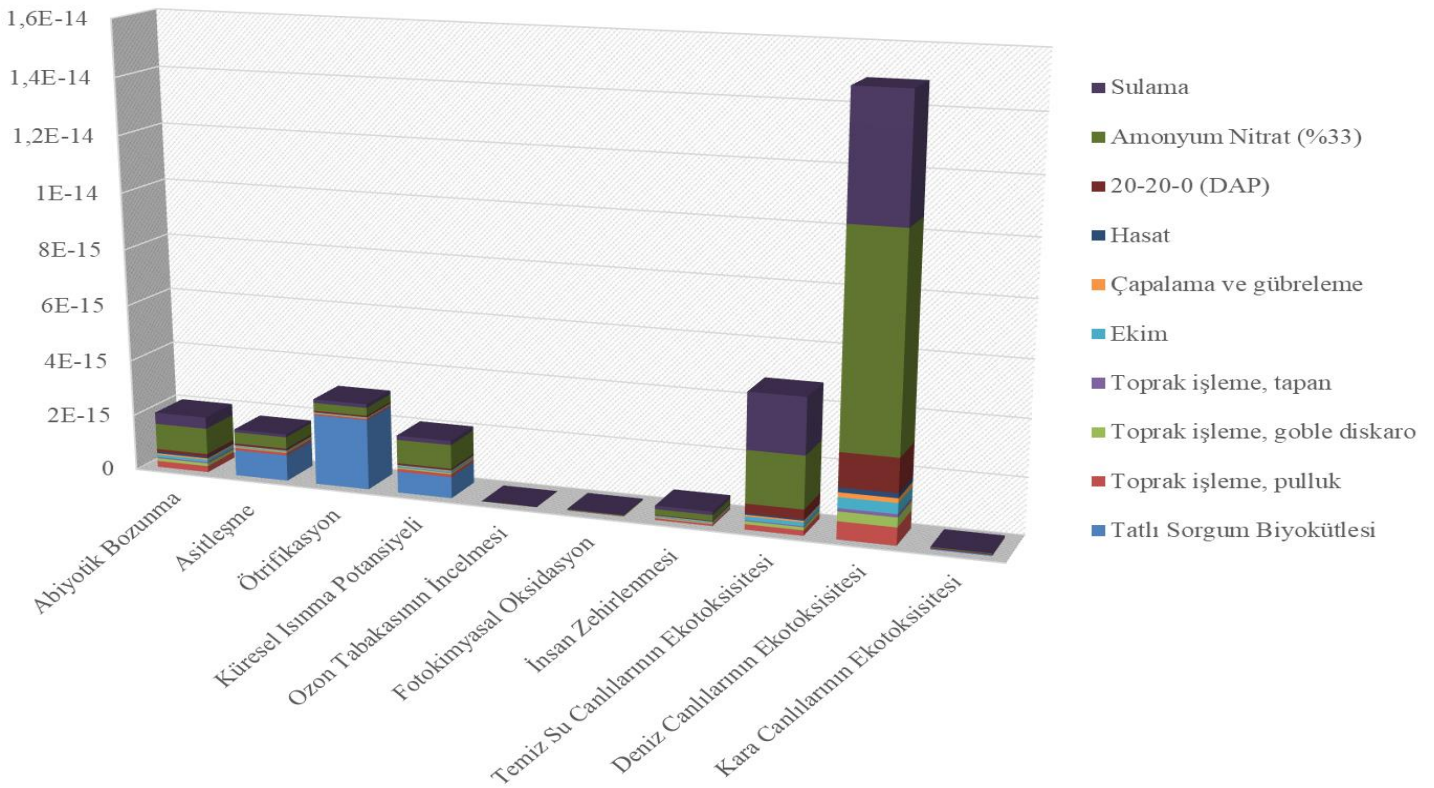
- Kara canlılarının ekotoksitesitesi, 0.00001257 kg 1.4-DCB-eş kg_{biyokütle}⁻¹ olarak hesaplanmış ve bu etkiye en fazla sebep olanın tatlı sorgum biyokütlesi (% 35.44) olduğu belirlenmiştir. Wang ve ark. (2014), 0.003886 kg 1.4-DCB-eş kg_{biyokütle}⁻¹ olarak hesaplamışlardır.

3.2.2. Normalleştirme Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Çevresel etkilerin kendi aralarında kıyaslanabilmesi için normalleştirme yapılmıştır. Normalleştirme sonuçlarıyla etki kategorileri kendi aralarında kıyaslanmış (Şekil 4) ve %'lik olarak dağılımları değerlendirilmiştir (Tablo 4).

Tablo 4. Etki kategorilerinin kendi aralarında kıyaslanmalarının %'lik dağılımı

Etki Kategorileri	%
Abiyotik Bozunma	6.93
Asitleşme	5.81
Ötrofikasyon	10.56
Küresel ısınma potansiyeli	7.07
Ozon tabakasının incilmesi	0.03
Fotokimyasal oksidasyon	0.20
İnsan zehirlenmesi	1.75
Temiz su canlılarının ekotoksitesitesi	16.30
Deniz canlılarının ekotoksitesitesi	51.03
Kara canlılarının ekotoksitesitesi	0.32
<i>Toplam</i>	<i>100.00</i>



Şekil 4. Normalleştirme değerlerinin etki kategorileri bazında karşılaştırılması

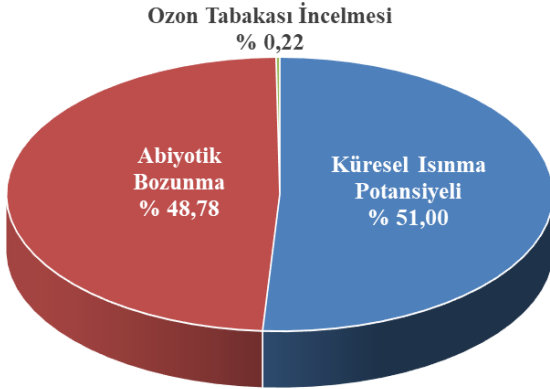
Tablo 4 ve Şekil 4 birlikte değerlendirildiğinde, tatlı sorgum biyokütlesi üretiminin % 51.03 ile deniz canlılarının ekotoksitesisine daha çok sebep olduğu belirlenmiştir. Deniz canlılarının ekotoksitesisini sırasıyla temiz su canlılarının ekotoksitesitesi (% 16.30) ve ötrofikasyon (% 10.56) etkilerinin

takip ettikleri saptanmış ve üretim sistemin de etkileri % 2.00'den küçük çıkan insan zehirlenmesi, kara canlılarının ekotoksitesitesi, fotokimyasal oksidasyon ve ozon tabakasının incilmesi etkilerinin de gözardı edilebileceği tespit edilmiştir.

3.2.3. Yorumlama

Küresel Ölçekte Etkiler

Üretim sisteminde küresel ölçekte etkiye sebep olan etkiler kendi aralarında değerlendirildiğinde (Şekil 5), küresel ölçekte en fazla sebep olan etkinin küresel ısınma potansiyeli (% 51.00) olduğu tespit edilmiştir. Küresel ısınma potansiyelini ise en çok AN gübre uygulamasının (% 41.07) arttırdığı saptanmıştır (Şekil 3). Bu nedenle; kutuplarda erime, rüzgar ve okyanus hareketlerinde değişimler ve mevsimlerde farklılık gibi iklimsel değişiklikler görülebilir.



Şekil 5. Etki kategorilerinin küresel ölçekte olan etkilerinin dağılımı

Küresel ölçekte etkiye sebep olan diğer bir etkinin de abiyotik bozunma (% 48.78) etkisi olduğunda saptanmıştır. Abiyotik bozunmayı ise en çok AN gübre uygulamasının (% 46.51) arttırdığı da belirlenmiştir (Şekil 3). Bu nedenle; yakın bir gelecekte doğal kaynakların tükenme/azalma ihtimali olabilir.

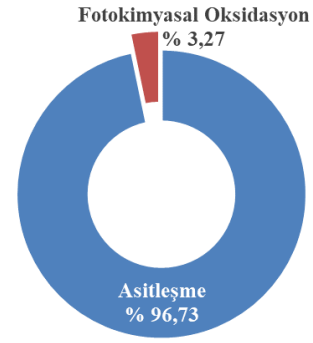
Hem küresel ısınma potansiyelini hem de abiyotik bozunmaya sebep olan küresel ölçekteki etkileri azaltmak amacıyla, üretim sisteminde sürdürülebilir gübreleme yapılmalıdır.

Ayrıca ozon tabakasının incelmesinin küresel ölçekteki etkisinin, göz ardı edilebilecek bir seviyede (% 0.22) olduğunda tespit edilmiştir.

Bölgesel Ölçekte Etkiler

Üretim sisteminde bölgesel ölçekte etkiye sebep olan etkiler kendi aralarında değerlendirildiğinde (Şekil 6), bölgesel ölçekte etkiye en fazla sebep olan etkinin asitleşme (% 96.73) olduğu tespit edilmiştir. Asitleşmeyi ise en çok tatlı sorgum biyokütlesinin (% 54.70) arttırdığı saptanmıştır (Şekil 3). Bu nedenle; biyokütlenin yetiştirildiği bölgenin topraklarında ve sulak alanlarında asitleşme görülebilir.

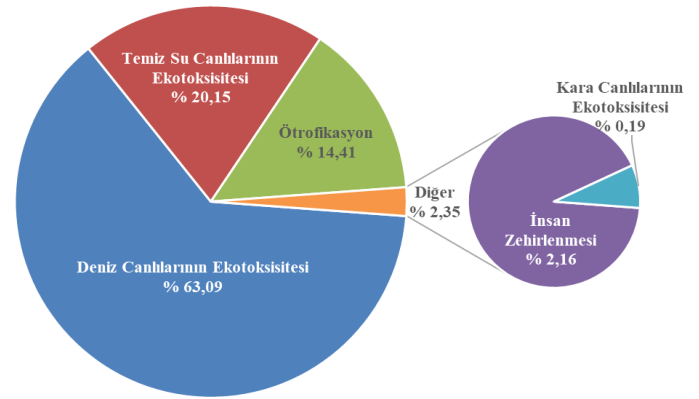
Ayrıca fotokimyasal oksidasyonun bölgesel ölçekte olan etkisinin, göz ardı edilebilecek bir seviyede (% 3.27) olduğunda tespit edilmiştir.



Şekil 6. Etki kategorilerinin bölgesel ölçekte olan etkilerinin dağılımı

Yerel Ölçekte Etki

Üretim sisteminde yerel ölçekte etkiye sebep olan etkiler kendi aralarında değerlendirildiğinde (Şekil 7), küresel ölçekte en fazla sebep olan etkinin deniz canlılarının ekotoksitesitesinin (% 63.09) olduğu tespit edilmiştir. Deniz canlılarının ekotoksitesitesini ise en çok AN gübre uygulamasının (% 50.56) arttırdığı saptanmıştır (Şekil 3). Bu nedenle; biyokütlenin yetiştirildiği lokaldeki deniz canlılarında bir azalma görülebilir ve biyoçeşitlilik değişebilir.

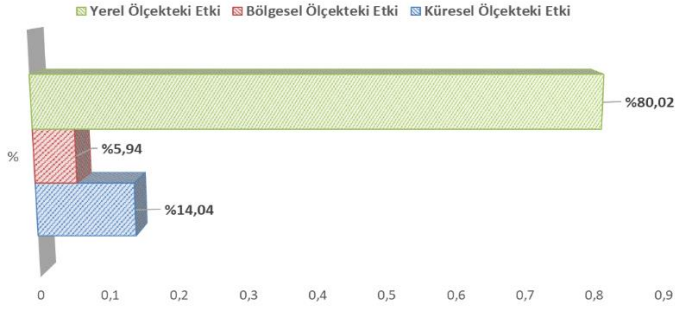


Şekil 7. Etki kategorilerinin yerel ölçekte olan etkilerinin dağılımı

Yerel etkiyi en fazla etkileyen deniz canlılarının ekotoksitesitesi dışında, temiz su canlılarının ekotoksitesitesi (% 20.15) ve ötrofikasyon da (% 14.41) sebep olmaktadır. Temiz su canlılarının ekotoksitesitesinin artmasına sulama (% 41.82) ve AN gübre uygulamaları (% 39.02) neden olmaktadır (Şekil 3). Bu nedenle; biyokütlenin yetiştirildiği yerdeki temiz su canlıları azalabilir/tükenebilir ve biyoçeşitlilik değişebilir. Ötrofikasyonun artmasına ise en fazla tatlı sorgum biyokütlesi (% 81.38) neden olmuştur (Şekil 3). Aşırı nitrat süzülmesi sebebiyle; biyokütlenin yetiştirildiği lokaldeki göllerde/nehirlerde aşırı bitki büyümesi olur ve biyoçeşitlilik zarar görebilir.

Ayrıca insan zehirlenmesi ve kara canlılarının ekotoksitesitesinin yerel ölçekte olan etkilerinin de göz ardı edilebilecek bir seviyede (sırasıyla % 2.16 ve % 0.19) olduklarında tespit edilmiştir.

Bütün ölçekteki etkiler birlikte değerlendirildiğinde (Şekil 8), tatlı sorgum biyokütlesi üretiminin en fazla yerel ölçüde etkiye (% 80.02) sebep olduğu saptanmıştır.



Şekil 8. Etki ölçeklerinin birbirleri ile kıyaslanması

Yerel ölçekteki etkiyi, küresel ölçekteki etki (% 14.04) ve bölgesel ölçekteki etkilerin (% 5.94) takip ettikleride tespit edilmiştir.

4. Sonuç

Tatlı sorgum üretiminde ortalama kuru biyokütle verimi 9135 kg ha⁻¹ saptanmış ve ısı değeri 18.53 MJ kg⁻¹ olarak hesaplanmıştır. Biyokütle üretimi amacıyla tatlı sorgum yetiştirilmesinin tarımsal yaşam döngüsü etki değerlendirmesinin normalleştirilmiş değerlerinin %'lik dağılımına göre, en fazla çevresel etkinin % 51.03 oranıyla deniz canlılarının ekotoksitesine sebep olduğu belirlenmiştir. Tarımsal yaşam döngüsü yorumlanmasına göre, üretimin % 80.02 oranıyla yerel etkiye sebep olduğu saptanmıştır. Ayrıca, küresel ısınma potansiyeli de 0.114 kg CO₂-eş kg^{biyokütle}⁻¹ (1043.51 kg CO₂-eş ha⁻¹) olarak hesaplanmıştır.

Normalleştirme sonuçlarına göre; gübre uygulamalarının (yaklaşık % 50 oranla) en fazla çevre kirleticiler oldukları belirlenmiştir. Bu nedenle, toprak analizleri iyi yapılmalı, gübre uygulamalarını azaltıcı önlemler alınmalıdır. Sulama yapılmasının gübre uygulamalarından sonra yaklaşık % 25 oranla çevreyi kirlenmekte ikinci sırada geldiği saptanmıştır. Bu nedenle, bitkinin yetişme sürecindeki su gereksinimi iyi araştırılmalıdır. Sulama teknolojileri çevresel etkilerini azaltıcı bir biçimde optimize edilmelidir. Literatürlerde biyokütle ürünlerinin çevreyi kirlenmediği bildirilmesine rağmen yapılan değerlendirme sonucunda tatlı sorgum biyokütlesinin, asitleşmeye, küresel ısınma potansiyeline, kara canlılarının ekotoksitesine ve ötrofikasyona neden olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, birçok ürünle ilişkili tarımsal YDD'leri yapılarak ürünlerin yetiştirilmesi sürecindeki çevresel etkileri saptanmalıdır. Özellikle, Türkiye için tarım ürünleri bazında tarımsal YDD envanteri veri tabanlarının oluşturulması ile ilgili çalışmalar artırılmalıdır.

Ek Bilgi

Bu çalışma, doktora tez çalışmasından türetilmiştir. Ayrıca 13. Uluslararası Tarım Makinaları ve Enerji Kongresinde (13-15 Eylül 2017 / İzmir) İngilizce ve sözlü özet olarak sunulmuştur.

Kaynakça

- Baran, M.F. & Gökdoğan, O. (2020). Determination of energy balance in pumpkin seed (*Cucurbita pepo* L.) Production. *European Journal of Science and Technology*, 19, 43-47.
- Boone, L., Van Linden, V., De Meester, S., Vandecasteele, B., Muylle, H., & ark. (2016). Environmental life cycle assessment of grain maize production: An analysis of factors causing variability. *Science of The Total Environment*, 553, 551-564.
- Christoforou, E., Fokaides, P. A., Koroneos, C. J. & Lucia R. (2016). Life cycle assessment of first generation energy crops in arid isolated island states: The case of Cyprus. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 14, 1-8.
- Eren, Ö. (2011). *Çukurova Bölgesinde Tatlı Sorgum (Sorghum Bicolor (L.) Moench) Üretiminde Yaşam Döngüsü Enerji ve Çevresel Etki Analizi*. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- El Bassam, N. (2010). *Handbook of Bioenergy Crops A Complete Reference to Species Development and Applications*. ISBN: 978-1-84407-854-7
- Frank M., Laginess T. & Schöneboom J. (2020) *Social life cycle assessment in agricultural systems – U.S. corn production as a case study*. In: Traverso M., Petti L., Zamagni A. (eds) *Perspectives on Social LCA*. SpringerBriefs in Environmental Science. Springer, Cham.
- Gilio L. & Moraes M. A. F. D. (2016) Sugarcane industry's socioeconomic impact in São Paulo, Brazil: A spatial dynamic panel approach. *Energy Econ*, 58, 27–37.
- Guiying, L., Weibin, G., Hicks, A. & Chapman, K. R. (2003). *A training manual for sweet sorghum. development of sweet sorghum for grain, sugar, feed, fiber, and value-added by-products, in the arid, saline-alkaline regions of China*. FAO - TCP/CPR/0066.
- IRENA (2017). *Energy Profile (Turkey)*. https://www.irena.org/IRENADocuments/Statistical_Profiles/Eurasia/Turkey_Eurasia_RE_SP.pdf erişim: 31.12.2020
- IRENA (2020). *Renewable Energy Statistics 2020*. ISBN 978-92-9260-246-8
- Karaağaç H.A., Baran, M.F., Mart, D., Bolat, A. & Eren Ö. (2019). Nohut üretiminde enerji kullanım etkinliği ve sera gazı (GHG) emisyonunun belirlenmesi (Adana ili örneği), *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 16, 41-50.
- Köppen, S., Reinhardt, G. & Gartner, S. (2009). Assessment of energy and greenhouse gas inventories of sweet sorghum for first and second generation bioethanol. *Environment and Natural Resources Management Series*, 30, FAO, Rome.
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (Part 1): Overview of biomass. *Bioresource Technology*, 83, 37–46.
- Miller, S. A., Sharp, B. E., Chamberlain, J. F., Sarkar, S. & Keerthi, S. (2020). Exploring adoption price effects on life cycle inventory results. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25, 1078-1087.
- Moraes M. A. F. D., Piedade Bachi M. R. & Caldarelli C. E. (2016) Accelerated growth of the sugarcane, sugar, and ethanol sectors in Brazil (2000–2008): effects on municipal gross domestic product per capita in the south-central region. *Biomass Bioenergy*, 91, 16–125.

- Mutlu, N. (2020). Tarımsal üretim için entegre kaynak verimliliği. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* , 20, 293-298.
- Vassilev, S.V., Baxter, D., Andersen, L.K. & Vassileva, C.G.. 2010. An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89, 913-933.
- Vatsanidou, A., Kavalaris, C., Fountas, S., Katsoulas, N. & Gemtos, T. (2020). A life cycle assessment of biomass production from energy crops in crop rotation using different tillage system. *Sustainability*, 12, 6978.
- Wang, M., Chen, Y., Xia, X., Li, J. & Liu, J. (2014). Energy efficiency and environmental performance of bioethanol production from sweet sorghum stem based on life cycle analysis. *Bioresource Technology*, 163, 74-81.
- Yin, C. Y. (2011). Prediction of Higher Heating Values of Biomass from Proximate and Ultimate Analyses. *Fuel*, 90, 1128-1132.
- Zhang, W., He, X., Zhang, Z., Gong, S., Zhang, Q., & ark. (2018). Carbon footprint assessment for irrigated and rainfed maize (*Zea mays* L.) production on the Loess Plateau of China. *Biosystems Engineering*, 167, 75-86.