

Muğla Atıksu Arıtma Tesisi Karbon Ayak İzinin Değerlendirilmesi

Sait GÜLLER*¹, Ahmet BALCI²

¹ Muğla Büyükşehir Belediyesi Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü, 48000, Muğla

² Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Bilimleri Anabilim Dalı, 48000, Muğla

(Alınış / Received: 05.03.2018, Kabul / Accepted: 11.09.2018, Online Yayınlanma / Published Online: 25.09.2018)

Anahtar Kelimeler

Atıksu arıtma tesisi,
Karbon ayak izi,
İklim değişikliği,
Küresel ısınma

Özet: Bu çalışmada Muğla ili Menteşe ilçesinde evsel atıksuyun arıtılması için işletilen 100 000 kişi/gün ve 17 111 m³/gün kapasiteli ileri biyolojik atıksu arıtma tesisinin karbon ayak izi hesaplanması amaçlanmıştır. 2015 ve 2016 yıllarına ait tesis işletmesinde kullanılan tüm kaynakların nicel olarak miktarları saha raporlarından elde edilmiştir. Saha verileri doğrudan ve dolaylı emisyonlar olarak gruplara ayrılmış ve hesaplamaya uygun hale getirilmiştir. Atıksu debisi, elektrik enerjisi, akaryakıt tüketimi, biyogazın yakılması, arıtma çamuru bertarafından kaynaklanan karbon emisyonları CCalC2 (ver.12.12.2016) [1] yazılımı aracılığı ile N₂O emisyonu ve kimyasal tüketiminden kaynaklanan dolaylı emisyonlar ise NGA 2014 [2] ve IPCC 2006 [3] dokümanları kullanılarak hesaplanmıştır. Çalışma neticesinde 2015 yılı işletme verilerine göre toplamda 77 316 ton CO₂ eşd., emisyon olduğu, biyogazdan elektrik enerjisi elde edilmesi ile 1 654 ton CO₂ eşd., emisyonun engellendiği, 2016 yılı işletme verilerine göre 82 946 ton CO₂ eşd. karbon ayak izi olduğu saptanmıştır.

Carbon Footprint Assessment of Mugla Waste Water Treatment Plant

Keywords

Wastewater treatment plant,
Carbon foot print,
Climate change,
Global warming

Abstract: In this study, it is aimed to calculate the carbon emissions of the Mugla wastewater treatment plant. Mugla domestic wastewater treatment plant is a 17 111 m³ / day biological wastewater treatment plant for the treatment of domestic wastewater. The amounts of resources used in the operation of the facilities for the years 2015 and 2016 were obtained from the field reports. These data for 2015 and 2016 were divided into groups and made available for calculation. Carbon emissions from wastewater, electricity, fuel consumption and sludge were calculated using CCalC2 (ver.12.12.2016) software. [1] The indirect emissions from N₂O emissions and chemical consumption were calculated manually using NGA 2014 [2] and IPCC 2006 [3] documents. In the study result in total 77 316 tons CO₂ eq, according to the properties of 2015. Emission of 82 946 tons CO₂ eq. occurred carbon footprint. from obtaining electricity from biogas, emission of 1,654 tons of CO₂ eq. is prevented, according to data properties in 2016.

1. Giriş

Günümüzde küresel ısınma ve iklim değişikliği konuları bilimin popüler konusu haline gelmiştir. Küresel ısınmaya etki eden sera gazları ve sera gazlarını oluşturan faaliyetlerin tespiti bu alandaki çalışmalara katkı sağlamaktadır. Karbon ayak izi değerlendirmesi iklim değişikliği etkilerini azaltmak için gerekli olan önemli bir yaklaşımdır. Atıksu arıtma tesislerinin işletilmesi sonucunda oluşan dolaylı ve doğrudan sera gazı emisyonları konusunda çok sayıda araştırma yapılmıştır. Bu çalışmalarda biyolojik ve işletme kaynaklı emisyonların envanteri

çıkartılarak doğrudan ve dolaylı emisyonların miktarları hesaplanmıştır. Doğrudan emisyonların bir çoğunun biyolojik kaynaklı olduğu görülmektedir.

Mannina ve arkadaşları [4] atıksuyun arıtılmasında karbon ve azot giderim süreçlerinde sera gazlarının meydana geldiğini tespit etmiştir.

Kyung ve arkadaşları [5] Güney Kore'de bulunan 5 500 m³/gün kapasitede, beş kademeli Bardenpho tasarımına sahip bir evsel atıksu arıtma tesisinin işletmesinde evsel atıksu, elektrik enerjisi, kimyasal madde tüketimi ve biyogaz üretimi verilerini

*İlgili yazar: stguller@gmail.com

kullanarak Monte Carlo simülasyon yöntemiyle toplam $11\,321 \pm 1\,136$ kg CO₂ eşd./gün emisyon oluştuğunu hesaplamıştır.

Gustavsson ve Tumlin [6] yaptığı çalışmada İskandinav ülkelerindeki 16 belediye atıksu arıtma tesisinde genel olarak karbon ayak izine N₂O'nun katkıda bulunduğunu ve karbon ayak izinin azaltması için biyogaz üretiminin artırılması ve biyogazın verimli kullanılması gerektiğini ortaya koymuştur.

Ülkemizde atıksu arıtma tesislerinin giriş atıksu kirlilik yükleri veya tasarım kabulleri dikkate alınarak bazı simülasyon araçları ile CO₂ emisyonları hesaplanmaktadır [7]. Ancak bu çalışmada aktif olarak işletilen bir atıksu arıtma tesisinin işletme verileri kullanılarak CO₂ emisyonu hesaplanmıştır. Çalışma kapsamında Muğla ilinde faaliyet gösteren 17 111 m³/gün kapasiteli ileri biyolojik atıksu arıtma tesisinin 2015 ve 2016 yılı işletmesi sonucunda meydana getirdiği doğrudan ve dolaylı CO₂ emisyonları CCalC2 [1] yazılımı, IPCC 2006 [3] ve NGA 2014 [2] dokümanları kullanılarak hesaplanmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Modelin kurulması

Atıksu arıtma tesisinin işletmesi sonucunda birden fazla kaynaktan CO₂ emisyonu oluşmaktadır. CO₂ gazı emisyonu hesaplamasında atıksu ve tüketilen kaynaklar, doğrudan ve dolaylı olarak gruplandırılarak hesaplama modeli kurulmuştur.

2.2. Muğla atıksu arıtma tesisi

Muğla Atıksu Arıtma Tesisi 2011 yılında Muğla İli Menteşe ilçesinde oluşan evsel nitelikli atık suyun arıtılması için kurulmuş ileri biyolojik bir atıksu

arıtma tesisidir. Tesis tasarımı evsel atıksu kirlilik konsantrasyonları dikkate alınarak Tablo 1'de verilen tasarım kriteri kabullerince yapılmıştır [8].

Tablo 1. Ham atıksu karakter kabulleri

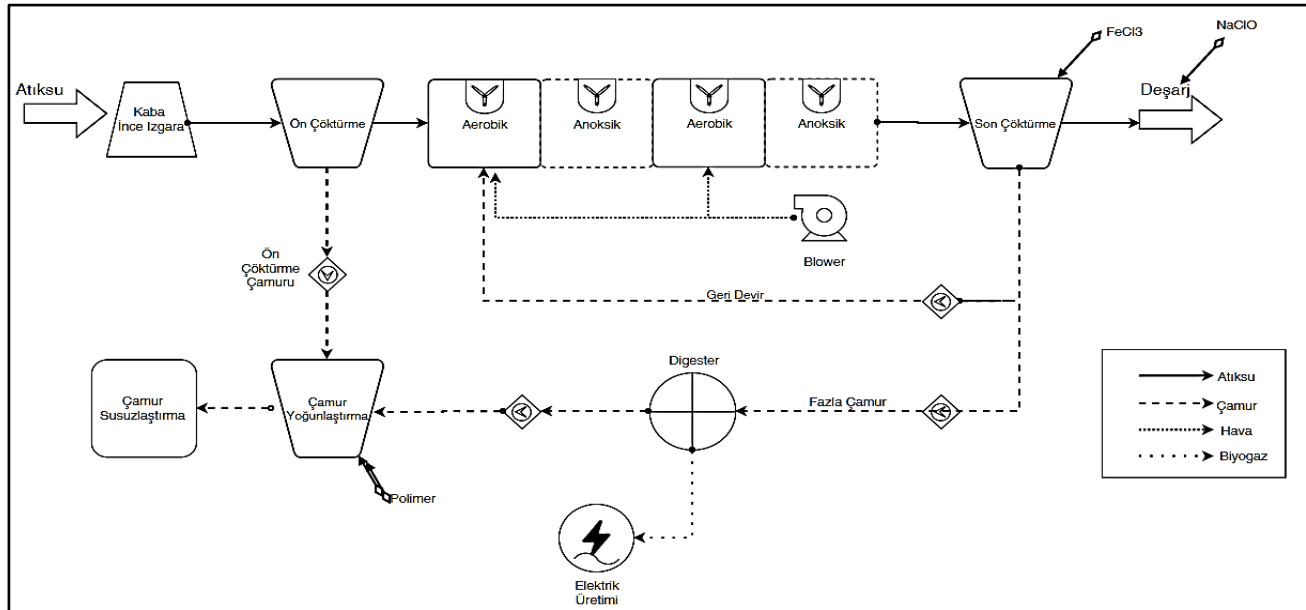
Kaynaklar	Birim	2020 Yılı Tasarım Yükleri	2040 Yılı Tasarım Yükleri
BOİ ₅	kg/gün	4 500	5 760
KOİ	kg/gün	9 000	11 520
AKM	kg/gün	7 000	8 960
TKN	kg/gün	1 000	1 280
TP	kg/gün	300	384

Tesis fiziksel arıtma, ön arıtma, fosfor tankı, havalandırma havuzu, son çöktürme havuzu, deşarj havuzu, anerobik biyogaz tankı ve kojenerasyon sisteminden oluşmaktadır. Proses akım şeması Şekil 1'de görülmektedir.

2.3. Doğrudan emisyonlar

Muğla Atıksu Arıtma Tesisi prosesinde fiziksel arıtma ile önce kaba ve ince katı malzeme tutulmaktadır. Atıksu daha sonra havalandırma havuzuna geçerek aerobik ve anoksik ortama alınmaktadır. Uzun havalandırma havuzunda aerobik kısımda kompleks biyokimyasal reaksiyonlar ve nitrifikasyon reaksiyonu gerçekleşmektedir. Anoksik kısımda ise denitrifikasyon reaksiyonu gerçekleşerek tüm biyolojik reaksiyonlar sonucu karbon, azot ve fosforlu organik bileşikler atıksudan uzaklaştırılmaktadır.

Gray'e göre [9] atıksuda bulunan mikroorganizmalar çözülmüş organik maddeleri bir besin kaynağı olarak kullandığı için atıksuda bulunan karbonun ve azotun bir kısmı yeni biyokütle, diğer bir kısmı CO₂ ve N₂O'ya dönüşür. Bu emisyonlar doğrudan biyolojik kaynaklı sera gazı emisyonu olarak kabul edilmektedir.



Şekil 1. Muğla Atıksu Arıtma Tesisi Proses Akım Şeması

Biyolojik procesten sonra fiziksel prosesin devamı olarak son çöktürme havuzunda gravite yöntemiyle atıksudan berrak üst arıtılmış atıksu elde edilmektedir. Bu esnada oluşan fazla biyolojik çamur anaerobik çamur çürütücü tanklara iletilerek hidroliz ve metanojen reaksiyon fazları ile biyogaz meydana gelmektedir. Anerobik arıtma farklı mikroorganizma gruplarının birlikte yardımlaşarak rol aldığı oldukça kompleks bir biyokimyasal süreçtir. Bununla birlikte genelde asitojenler, asetojenler ve metanojenlerin esas görevi üstlendiği bilinmektedir. Bu biyokimyasal süreç iki aşamalı olarak gerçekleşir. Fakültatif ve asetik asit oluşturan mikroorganizmalar, kompleks organik maddeyi uçucu organik asitler haline dönüştürür. Bu olay sonucu asetik asit, propiyonik, bütirik ve diğer organik asitler oluşur ve sistemde toplam organik madde miktarında düşüş meydana gelir. İkinci aşamada metan üreten bakteriler tarafından uçucu organik asitler CH₄ ve CO₂'ye dönüştürülür [10].

Anerobik reaksiyon sonucunda üretilen biyogazın kojen motorunda yakılmasıyla elektrik enerjisi ve atık ısı oluşmaktadır. Üretilen elektrik enerjisi tesis ana şebekesinde kullanılırken, atık ısı eşanjörden geçirilerek anaerobik çamur çürütücü tankın mezofilik ortamının devamı için kullanılmaktadır.

Bu çalışmada tesis işletmesinden meydana gelen biyolojik faaliyetler sonucu oluşan tüm CO₂ ve N₂O emisyonları doğrudan ton CO₂ eşd. emisyonu olarak hesaplanmıştır. Muğla Atıksu Arıtma Tesisi işletmesinde doğrudan emisyon olarak kabul edilen işletme kaynakları Tablo 2 'de verilmiştir.

Tablo 2. Doğrudan emisyon kaynakları

Kaynaklar	Birim
Atıksu	m ³
Biyogaz Üretimi	m ³
Elektrik Enerjisi	kWh
Arıtma Çamuru Bertarafı	ton

2.4. Dolaylı emisyonlar

Tesis işletmesinde atıksuyun bir yerden bir yere iletilmesi, havalandırma havuzunun oksijenlenmesi, çamurun susuzlaştırılması için birçok mekanik ekipman çalıştırılmaktadır. İşletme süresince çalışan tüm blower, dekantör, mikser, santrifüj pompa vb. mekanik ekipmanlar elektrik enerjisi tüketmektedir. Jeneratör vb. mekanik ekipmanlar fuel-oil, nakliye ve genel işler için araçlar benzin kullanmaktadır. Son çöktürme havuzunda stabil çamur floklarının sağlanması ve çökeltme oranının yüksek olması için koagülant olarak FeCl₃ dozlanmaktadır.

Anerobik çamur çürütücünden çıkan fazla çamurun susuzlaştırma işleminde katyonik polielektrolit, arıtılmış atıksudaki patojenlerin dezefeksiyonu için NaClO kullanılmaktadır. Tüm tüketilen kimyasalların üretimi sırasında oluşan emisyonlar dolaylı emisyon olarak hesaplanmıştır. Muğla Atıksu Arıtma Tesisi işletmesinde dolaylı emisyon olarak kabul edilen işletme kaynakları Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Dolaylı emisyon kaynakları

Kaynaklar	Birim
Elektrik Tüketimi	kWh
Fuel-oil Tüketimi	ton
Benzin Tüketimi	ton
FeCl ₃ Tüketimi	ton
Polimer Tüketimi	ton
NaClO Tüketimi	ton

2.5. Verilerin elde edilmesi

Muğla Atıksu Arıtma Tesisi Muğla İli Menteşe ilçesinde oluşan evsel atıksuyun ileri biyolojik yöntemlerle arıtılması ve Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği'ne [11] göre deşarj edilmesi için 2011 yılından beri işletilmektedir. İşletme esnasında tüketilen tüm kaynakların ve üretimlerin verileri düzenli olarak bilgisayar ortamına kaydedilmiştir. Bu çalışmada kullanılan 2015 ve 2016 yılları işletmesine ait tüm veriler saha çalışması ile elde edilmiştir. Muğla Atıksu Arıtma Tesisi'nin CO₂ emisyonu hesaplamasında kullanılan işletme verileri Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. Muğla Atıksu Arıtma Tesisi işletme verileri

Kaynaklar	Birim	2015 Yılı Miktarı	2016 Yılı Miktarı
Atıksu Debisi	m ³	2 712 107	2 863 293
Elektrik Tüketimi	kWh	1 655 778	2 044 919
Fuel-oil Tüketimi	ton	59.752	8.694
Benzin Tüketimi	ton	1.636	1.850
FeCl ₃ Tüketimi	ton	108	78
Polimer Tüketimi	ton	5.5	6.475
NaClO Tüketimi	ton	27	-
Biyogaz Üretimi	m ³	612 224	-
Elektrik Üretimi	kWh	402 350	-
Arıtma Çamuru	ton	3 997	3 660

2.6. Metod

Muğla Atıksu Arıtma Tesisi'nin kümülatif CO₂ emisyonunun hesaplanmasında The Carbon Calculations over the Life Cycle of Industrial Activities (CCalC2) [1] yazılımı, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2006) [3] ve National Greenhouse Accounts Factors (NGA 2014) [2] dokümanları kullanılmıştır. Muğla Atıksu Arıtma Tesisi'nin 2015 ve 2016 işletme verileri için uygulanan CO₂ emisyonu hesaplama yöntemleri Tablo 5' de verilmiştir.

Tablo 5. Emisyon Kaynakları Hesaplama Metodu

Kaynaklar	Metod
Atıksu Debisi	CCalC2
Biyolojik N ₂ O Emisyonu	IPCC (2006)
Elektrik Tüketimi	CCalC2
Fuel-oil Tüketimi	CCalC2
Benzin Tüketimi	CCalC2
FeCl ₃ Tüketimi	NGA (2014)
Polimer Tüketimi	NGA (2014)
NaClO Tüketimi	NGA (2014)
Biyogaz Üretimi	CCalC2
Elektrik Üretimi	CCalC2
Arıtma Çamuru	CCalC2

CCalC2 [1] yazılımında bulunmayan CO₂ emisyon verileri için IPCC 2006 [3] ve NGA 2014 [2] dokümanları kullanılmıştır. Türkiye’de elektrik üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonu Atılğan ve Azapagic’in [12] çalışmasında verilen emisyon faktörleri CCalC2 [1] yazılımına işlenerek hesaplama yapılmıştır.

3. Bulgular

3.1. Evsel atıksudan kaynaklanan emisyon

2015 ve 2016 yılı atıksu debileri aylık olarak Tablo 6’da görülmektedir. 2015 yılı 2 712 107 m³, 2016 yılında 2 863 293 m³ atıksu arıtılmıştır. Aylık atıksu miktarı verilerinde yaz ve kış aylarında herhangi bir farklılık bulunmamaktadır. Bu durum Muğla Atıksu Arıtma Tesisi’nin turizm bölgesinde bulunmamasından kaynaklanmaktadır.

Tablo 6. Atıksu Debi Miktarları (m³)

Ay/Yıl	2015	2016
Ocak	250 663	259 653
Şubat	317 450	231 649
Mart	288 894	265 210
Nisan	218 862	222 232
Mayıs	220 000	255 456
Haziran	180 507	217 720
Temmuz	176 063	211 801
Ağustos	180 057	213 818
Eylül	183 166	215 169
Ekim	230 169	266 355
Kasım	239 575	250 835
Aralık	226 701	253 395
TOPLAM	2 712 107	2 863 293

CCalC2 yazılımı ile yapılan hesaplama sonucunda sadece atıksudan kaynaklı 2015 yılı için 77 300 ton CO₂ eşd., 2016 yılı için 81 600 ton CO₂ eşd. emisyonun meydana geldiği ortaya çıkmıştır.

3.2. Biyolojik faaliyet sonucu N₂O emisyonu

Atıksuyun arıtma tesisine gelmesi ve havalandırma havuzuna giriş yapması ile birlikte biyolojik faaliyet başlamaktadır. Muğla Atıksu Arıtma Tesisinin havalandırma havuzu aerobik ve anoksik iki fazlı tek bir havuz olması sebebiyle nitrifikasyon ve denitrifikasyon aynı havuzda gerçekleşmektedir.

Nitrifikasyon ve denitrifikasyon reaksiyonu sonucu N₂O gazının oluştuğu ve atmosfere karıştığı bilinmektedir. Bu esnada oluşan N₂O miktarı aşağıda verilen Denklem (1)’e göre yapılmıştır.

$$N_2O_{\text{tesis}} = P \cdot (T_{\text{tesis}}) \cdot (F_{\text{indikatör}}) \cdot (EF_{\text{tesis}}) \quad (1)$$

N₂O_{tesis}: Toplam tesis stok N₂O emisyonu (kg N₂O/yıl)

P: Nüfus

T_{tesis}: Şehirde arıtma tesisini kullanan nüfus yüzdesi

F_{indikatör-sabit}: 1.25

EF_{tesis}: Emisyon faktörü 3.2 g N₂O/kişi.yıl

P: 105 860 kişi [13]

T_{tesis}: 0.944 değerleri kabul edilerek Denklem (1)’e göre yapılan hesaplamada N₂O’dan kaynaklı emisyon miktarı 2015 ve 2016 yılları için 0.3997 ton N₂O/yıl olarak hesaplanmıştır.

IPCC 2006 [3]’da verilen emisyon çevirim faktörleri kullanıldığında ise 118.719 ton CO₂/yıl emisyon oluştuğu ortaya çıkmıştır.

3.3. Elektrik tüketiminden kaynaklanan emisyon

Atıksu arıtma tesisi biyolojik arıtma prosesinin yürütülmesi sürecinde dalgıç, santrifüj pompa, karıştırıcı, dekantör, kaba ve ince ızgara, redüktör gibi elektrik tüketen mekanik ekipmanlar kullanılmaktadır. Tesiste 135 adet farklı güçte mekanik ekipman bulunmakta ve bu cihazlar günün belirli saatleri sürekli ya da kesikli olarak çalışmaktadır. Tüketilen elektrik enerjisi sayaçla kontrol edilmekte ve günlük tutulmaktadır. 2015 ve 2016 yılına ait aylık elektrik enerjisi kullanımı Tablo 7’de verilmiştir. 2015 yılı 1 655 778 kW, 2016 yılı 2 044 919 kW elektrik enerjisi kullanıldığı görülmektedir.

Tablo 7. Elektrik enerjisi tüketimleri (kw)

Ay/Yıl	2015	2016
Ocak	164 818	135 907
Şubat	146 911	149 274
Mart	162 962	159 649
Nisan	134 046	160 307
Mayıs	154 558	183 461
Haziran	136 526	181 846
Temmuz	135 071	172 397
Ağustos	122 993	182 925
Eylül	127 776	163 054
Ekim	123 629	204 251
Kasım	118 524	176 600
Aralık	127 964	175 248
TOPLAM	1 655 778	2 044 919

Türkiye’deki kömürden elektrik üretimi sonucu oluşan emisyonların net ortaya konulması için Atılğan ve Azapagic’in [12] çalışması sonucu Türkiye’de elektrik enerjisi üretiminde oluşan CO₂ emisyonuna ait emisyon faktörü kullanılmıştır. 2015 ve 2016 yılı elektrik tüketiminden kaynaklanan CO₂ emisyonu hesaplama sonuçları Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 8. Elektrik enerjisi emisyon sonuçları

Yıl	Elektrik Enerjisi (kW)	Atılğan ve Azapagic [12] (ton CO ₂ eşd.)
2015	1 655 778	865.971
2016	2 044 919	1 069.490

3.4. Akaryakıt tüketimi sonucu emisyon

Atıksu arıtma tesisinde biyolojik arıtma prosesinin işletilmesinde enerji kesintisinde jeneratörün, araçların ve çamur nakliyesi içinde kamyonların kullanmış olduğu fuel-oil tüketimleri kayıt altına alınmıştır. 2015 ve 2016 yılı fuel-oil verileri incelendiğinde 2015 yılı tüketimin 59.752 ton, 2016

yılı tüketimin 8.694 ton olduğu görülmektedir. İki veri arasındaki fark 2016 yılında havalandırma havuzundan daha az çamur çekilmesi ve bertarafında daha az araç kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Diğer bir etki ise elektrik enerjisi kesintilerinin az olması sonucu daha az sürelerde jeneratör çalışmasıdır.

2015 ve 2016 yılı akaryakıt tüketiminden kaynaklı doğrudan emisyonların hesaplanması için CCalC2 yazılımı kullanılmıştır. Hesaplama sonucunda akaryakıt tüketiminden kaynaklı emisyonların 2015 yılı için 122.830 ton CO₂ eşd., 2016 yılı için 22.470 ton CO₂ eşd. olduğu görülmüştür. Tablo 9'da tüketilen yakıtlar ve yakıt türlerine göre oluşan CO₂ emisyon miktarları verilmiştir.

Tablo 9. Yakıt tüketimi ve emisyon miktarları

Yıl	Yakıt Tipi	Yakıt Miktarı (ton)	Emisyon Miktarı (ton CO ₂ eşd.)
2015	Fuel-oil	59.752	122.830
	Benzin	1.636	
2016	Fuel-oil	8.694	22.470
	Benzin	1.850	

3.5. Kimyasal tüketiminden kaynaklanan emisyon

Atıksu arıtma tesisinde biyolojik arıtma prosesinin işletilmesi sürecinde çamur susuzlaştırma işleminde polielektrolit, son çöktürmede FeCl₃, deşarj suyunun defekasyonu için NaClO kullanılmaktadır. Tüketilen kimyasal madde miktarları Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 10. Tüketilen kimyasal madde miktarı

Yıl	Kimyasal Madde Tipi	Miktar (kg)
2015	Polimer	5 500
	FeCl ₃	108 000
	NaClO	27 000
2016	Polimer	6 475
	FeCl ₃	78 000
	NaClO	-

Kimyasalların meydana getirdiği emisyonların hesaplanmasında NGA 2014 [2] dokümanı kullanılarak hesaplama manuel olarak yapılmış ve sonuçlar Tablo 11'de verilmiştir. 2015 yılı için 64.479 ton CO₂ eşd., 2016 yılı için 49.632 ton CO₂ eşd. olarak hesaplanmıştır.

Tablo 11. Kimyasal tüketiminden kaynaklı emisyon

Yıl	Kimyasal Madde Tipi	Emisyon Katsayıları (kg CO ₂ eşd./ kg katı madde)	Emisyon Miktarı (ton CO ₂ eşd.)	Toplam (ton CO ₂ eşd.)
2015	Polimer	1.182	6.506	64.479
	FeCl ₃	0.539	58.212	
	NaClO	1.155	0.031	
2016	Polimer	1.182	7.659	49.632
	FeCl ₃	0.539	42.042	
	NaClO	1.155	-	

3.6. Biyogazdan üretilen elektrik enerjisi sonucu engellenen emisyon

Muğla Atıksu Arıtma Tesisi'nde bulunan anaerobik çamur çürütücülerden biyogaz üretilmekte ve biyogaz bir kojen motorunda yakılmaktadır. Kojen motorunda biyogazın yakılması sonucunda elektrik enerjisi üretilmektedir. 2015 yılı işletme verilerine göre 612 224 m³ biyogaz üretilmiştir. Biyogazın yakılması sonucu 402 350 kWh elektrik geri kazanılmıştır. Geri kazanılan elektrik enerjisi sonucu engellenen emisyon miktarı hesaplandığında 1 654 ton CO₂ eşd. olduğu saptanmıştır. 2016 yılında ise bazı işletme sebeplerinden dolayı biyogazdan elektrik üretimi yapılamamıştır.

3.7. Biyogazın yakılması sonucu oluşan emisyon

Muğla Atıksu Arıtma Tesisi'nde üretilen 612 224 m³ biyogazın yakılması sonucu oluşan emisyon miktarı Ecoinvent veri tabanı kullanılarak CCalC2 yazılımı ile hesaplanmış ve 394 ton CO₂ eşd. emisyon olduğu ortaya çıkmıştır.

3.8. Arıtma çamuru bertarafından oluşan emisyon

Muğla Atıksu Arıtma Tesisi'nde biyolojik arıtma sonucu oluşan 2015 yılında 3 997 ton ve 2016 yılından 3 660 ton arıtma çamurundan kaynaklı emisyon miktarı Ecoinvent veri tabanı kullanılarak ton cinsinden girilmiş, 2015 yılında 74.5 ton CO₂ eşd. ve 2016 yılından 68.4 ton CO₂ eşd. emisyonun olduğu hesaplanmıştır.

4. Tartışma ve Sonuç

2015 ve 2016 yılları biyolojik atıksu arıtma tesisi işletmesi sonucunda oluşan CO₂ emisyonlarının toplamı ve biyogazdan elektrik üretilmesiyle engellenen CO₂ emisyon miktarı kümülatif olarak hesaplanmıştır. Hesaplama sonucunda Muğla Atıksu Arıtma Tesisi'nin 2015 yılı CO₂ emisyon miktarı 77 316 ton CO₂ eşd. 2016 yılı CO₂ emisyon miktarı 82 946 ton CO₂ eşd. olarak saptanmıştır. Tüm emisyon miktarlarının detaylı dağılımı, atıksu ve tüketilen elektrik enerjisi oranları Tablo 12'de verilmiştir.

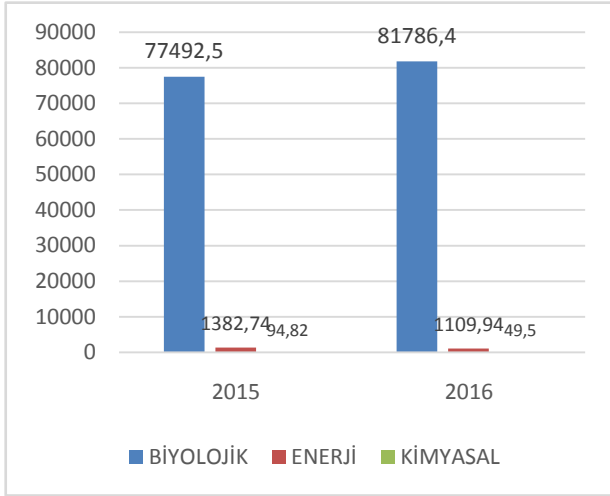
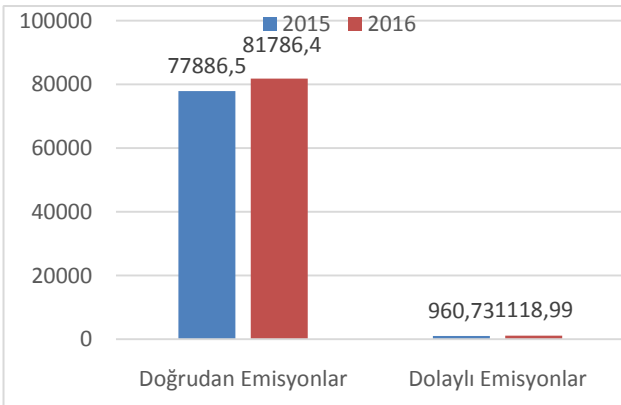
Muğla Atıksu Arıtma Tesisi'nin 2015 yılı atıksu verisine göre m³ başına düşen CO₂ emisyonu 28.5 kg CO₂/m³, 2016 yılı için bu değer 28.96 kg CO₂/m³'tür. Toplam CO₂ ve debiye oranla CO₂ emisyon verilerine bakıldığında 2016 yılında işletmeden dolayı daha fazla emisyon olduğu ancak tüketilen elektrik enerjisine göre bakıldığında daha az CO₂ emisyonu olduğu görülmektedir.

Muğla Atıksu Arıtma Tesisi'nin 2015 ve 2016 yılları karbon ayak izine bakıldığında Şekil 2'de görüleceği gibi CO₂ emisyonunun en fazla evsel atıksuyun biyolojik arıtılması daha sonra ise elektrik ve yakıt enerjisi tüketiminden kaynaklandığı görülmektedir.

Tablo 12. 2015 ve 2016 Yılları Emisyon Dağılım Miktarları

Emisyon Kaynağı	Hesaplama Metodu	2015 Yılı Emisyon Miktarı (ton CO ₂ eşd.)	2016 Yılı Emisyon Miktarı (ton CO ₂ eşd.)
Atıksudan Kaynaklı Emisyon	CCalC2	77 300	81 600
Biyolojik Arıtma Kaynaklı N ₂ O Emisyonu	IPCC (2006)	118	118
Elektrikten Kaynaklı Emisyon	CCalC2	865.91	1 069.5
Fuel-oilden Kaynaklı Emisyon	CCalC2	118	34.94
Benzinden Kaynaklı Emisyon	CCalC2	4.830	5.5
Polielektrolitten Kaynaklı Emisyon	NGA (2014)	6.5	7.5
FeCl ₃ tüketiminden Kaynaklı Emisyon	NGA (2014)	58.21	42
NaClO tüketiminden Kaynaklı Emisyon	NGA (2014)	30.11	-
Üretilen Biyogazın Yakılmasından Kaynaklı Emisyon	CCalC2	394	-
Elektrik Geri Kazanımdan Engellenen Emisyon	CCalC2	-1 654	-
Arıtma Çamurundan Kaynaklı Emisyon	CCalC2	74.5	68.4
NET TOPLAM EMİSYON		77 316	82 946
m ³ Atıksu Başına Düşen CO ₂ Emisyonu (kg CO ₂ eşd./m ³ atıksu)		28.5	28.96
kWh Elektrik Tüketimi Başına Düşen CO ₂ Emisyonu (kg CO ₂ eşd./kwh)		46.7	40.56

2016 yılında biyolojik proste farklı işletme denemeleri sonucunda biyogaz üretimi olmamasından dolayı biyogazın yakılması sonucu herhangi bir emisyon oluşmamıştır. Aynı zamanda biyogazdan elektrik üretimi olmaması ile emisyon da engellenememiştir. 2015 yılı için biyogazdan elektrik enerjisi elde edilmesiyle net engellenen emisyon miktarı 1 654 ton CO₂ eşd. olarak hesaplanmıştır.

**Şekil 2.** Kaynağına göre emisyon miktarları (ton CO₂ eşd.)**Şekil 3.** Doğrudan ve dolaylı emisyon miktarları (ton CO₂ eşd.)

Muğla Atıksu Arıtma Tesisi'nin işletme süresince oluşan emisyonlarından en büyük hacmi doğrudan emisyonlar oluşturmaktadır. Doğrudan emisyonların en büyüğü ise biyolojik arıtma kaynaklıdır. Tüm CO₂ emisyon dağılımları Şekil 3 'de görülmektedir.

Muğla Atıksu Arıtma Tesisi işletilmesi sonucunda oluşan CO₂ emisyonu hesaplama metodu, doğrudan ya da dolaylı emisyonların dikkate alındığı çalışmalar ile değerlendirilmiştir.

Monteith vd. [14] Geneva'da bulunan 173 500 m³/gün kapasiteli bir şehir atıksu arıtma tesisinin sadece biyolojik arıtma reaksiyonu sonucu oluşan emisyonunun hesaplanmasını amaçlayan çalışmada Genova'da oluşan atıksuyun artırılması için işletilen 173 500 m³/gün kapasiteli biyolojik atıksu arıtma tesisinin 1.065 kg CO₂ eşd./m³ emisyon oluşturduğunu belirtmiştir.

Gupta ve Singh [15] çalışmasında Yeni Zelanda'da bulunan evsel bir atıksu arıtma tesisinin biyolojik emisyonunun 2 424.6 ton CO₂/yıl ve 9.96 kg CO₂ eşd./m³ olduğu görülmüştür.

Das [16] Windsor İngiltere'de 72 000 m³/gün kapasitede bulunan evsel atıksu arıtma tesisi emisyonlarının belirlenmesi için yaptığı çalışmada, atıksu arıtma tesisinin işletilmesinde biyolojik arıtma kaynaklı 4 589 ton CO₂ eşd. emisyon oluştuğunu ve 63.730 kg CO₂/m³ emisyonu karşılık geldiğini belirtmiştir.

Erdoğan [17] İstanbul Katı Atık Düzenli Depolama Sahası atıksuları ile ilgili yaptığı çalışmasında, atıksu arıtma tesislerinden, sera gazları açısından en yüksek miktara 2 072 000 ton CO₂ eşd./yıl ile anaerobik stabilizasyon havuzlarının, ikinci senaryo olan biyolojik atıksu arıtma tesislerinden kaynaklanan toplam sera gazı emisyonunun 1 323 000 ton CO₂ eşd./yıl, üçüncü senaryoda ileri atıksu arıtma tesislerinde ise bu miktarın 424 000 ton CO₂ eşd./yıl olduğunu belirtmiştir. Biyolojik atıksu arıtmadan

kaynaklanan CO₂ emisyonunun 18.33 kg CO₂/m³ olduğu ortaya çıkmıştır.

Flores-Alsina vd. [18] yaptığı çalışmada elektrik enerjisinden kaynaklanan emisyon haricinde toplam hacmi 3 000 m³ 2 adet, 9000 m³ 3 adet aerobik tankın biyolojik faaliyeti sonucunda senaryoya göre 1.142, 1.032, 1.044, 1.100 kg CO₂ eşd./m³ emisyon oluşacağını belirtmiştir.

Benzer çalışma sonuçlarının bu çalışma ile arasındaki ilişkinin değerlendirilmesi Tablo 13'de verilmiştir.

Tablo 13. Benzer Çalışma Sonuçlarının Karşılaştırılması

Çalışma Adı	Emisyon İçeriği	Emisyon Miktarı (kg CO ₂ eşd./m ³)
Monteith vd., [13]	Doğrudan	1.065
Gupta ve Singh, [14]	Doğrudan	9.96
Das, [15]	Doğrudan	63.73
Erdoğan, [16]	Doğrudan+Dolaylı	18.33
Flores-Alsina vd., [17]	Doğrudan+Dolaylı	1.142
Bu Çalışma	Doğrudan+Dolaylı	28.5

Tablo 13'de görüleceği üzere baz alınan çalışmalarda kg CO₂ eşd./m³ emisyon miktarları birbiri ile paralellik göstermekte ancak hesaplama sonucu ortaya çıkan bazı farklılıklar da bulunmaktadır. Bu farklılıklar yapılan çalışmalarda atıksu kirlilik yük miktarı, giderilen KOİ, BOİ oranlarının farklılığı, elektrik enerjisinin yenilenebilir kaynaklardan sağlanması, CO₂ emisyonu hesaplama yöntemi ve emisyon faktörlerinin değişimi gibi nedenlerden ortaya çıkmaktadır.

Muğla Atıksu Arıtma Tesisi'nin işletmesi sonucunda oluşan toplam CO₂ emisyonunu diğer CO₂ emisyonu oluşturan faaliyetler ile değerlendirmesi yapılmıştır. Farklı üretim sektörlerine ait ve biyolojik kaynaklı emisyonların hesaplama dahil edilmediği CO₂ emisyon miktarları Tablo 14'de verilmiştir. ABD'de bulunan bu işletmelerin 2016 yılı doğrudan CO₂ emisyonları IPCC AR4 [19] dokümanına göre hesaplanmıştır [20].

Tablo 14. Faaliyetlere Göre CO₂ Emisyonu Miktarı

İşletme Adı	Faaliyet Alanı	Kapasite	Toplam Emisyon Miktarı (ton CO ₂ /yıl)
James H. Miller	Kömür Santrali	2640 MWh	19 733 139
Arcelormittal Burns Harbor	Demir-Çelik	5 Mt/yıl	9 383 955
Donaldsonville	Gübre	5 Mt/yıl	7 829 243
Flint Hills Resources	Rafineri	586.470 varil/gün	2 449 656
McCommas Bluff	Katı Atık Bertarafı	600.000 ton/yıl	716 472
Maysville Mill	Atıksu Arıtma	Bulunamadı	50 047
Muğla AAT (Bu çalışma)	Evsel Atıksu	17.111 m ³ /gün	86 565

Enerji üretimi, metal endüstrisi, petrol rafinerisi ve fosil kaynaklı madenlerin elde edilmesi gibi faaliyetlerin çok yüksek miktarda CO₂ emisyonu oluşturduğu Tablo 14'de görülmektedir. Seçilen örnekler arasında en yüksek emisyonu 2 640 MWh kapasiteye sahip James H. Miller kömür santrali, en düşük emisyonu ise Maysville Mill kağıt fabrikası atıksu arıtma tesisi oluşturmaktadır. Muğla Atıksu Arıtma Tesisi ise 2015 yılı toplam 77 316 ton CO₂ eşd./yıl, 2016 yılı toplam 82 946 ton CO₂ eşd./yıl emisyon ile diğer işletmelerden daha az emisyon oluşturmıştır.

Bu durum fosil yakıt kullanarak enerji üretimi yapan santrallerin, metal üretim endüstrisinin, petrol rafinerilerinin ve fosil kaynaklı madenlerin çıkarılması esnasında atmosfere yüksek hacimlerde CO₂ emisyonu olduğunu, atıksu arıtma tesislerinin ise daha az CO₂ emisyonu katkısında bulunduğunu göstermektedir. Tablo 13'de verilen benzer atıksu arıtma tesislerinin doğrudan ve dolaylı emisyon miktarlarının birbirine paralelliklerinin sebebi emisyon faktörleridir.

Bütün bu veriler ışığında atıksu arıtma tesislerinin emisyon hesaplarında hesaplamaların hangi amaçla kullanılacağı net belirlenerek doğrudan ve dolaylı emisyonların ayrımları yapılmalı ve sonrasında doğru emisyon hesaplama metodu seçilmelidir. Karbon ayak izi ve sera gazı emisyonu konularında çalışma yapan bilim insanlarınca kabul gören emisyon hesaplama metodunun seçilmesi emisyonların mukayese edilebilmesi, güvenilirliğin ve şeffaflığın sağlanması açısından önemli bir husustur.

5. Çözüm Önerileri

Muğla Atıksu Arıtma Tesisi 2015 yılı işletmesinde biyogazdan elektrik üretimi yapılmış ve 2016 yılında bu fark, engellenen CO₂ emisyonu olarak ortaya konmuştur. Atıksu arıtma tesisinden kaynaklanan CO₂ emisyonunun azaltılması akaryakıt tüketiminin azaltılması, karbon ve azot gideriminin yüksek verimle yapılmasıyla mümkündür [21].

Evsel atıksu arıtma tesisi karbon ayak izinin azaltılmasında ilk yapılması gereken iş biyolojik atıksu arıtma prosesinin karbon ve azot gideriminde doğru tasarlanmasıdır. Biyolojik prosesin tasarımında yüksek karbon ve azot giderimi baz alınmalıdır. Bunun yanında giriş atıksu kirlilik yükleri dikkate alınarak oluşan fazla çamurun anaerobik ortamda parçalanarak biyogaza dönüştürülmesinin teknik imkanına bakılmalıdır. Eğer teknik olarak fazla biyolojik çamurun anaerobik reaksiyonla parçalanarak biyogaz elde edilebilecekse elektrik üretimi ve CO₂ emisyonunun azaltılması için bu yöntem tercih edilmelidir. Atıksu arıtma tesisinde kullanılan dalgıç, santrifüj pompalar, blower, aeratör gibi hava üreten elemanlar, komprasörler, mikser, dekantör, belt press gibi çamur susuzlaştırmada kullanılan mekanik

ekipmanlara ait elektrik motorlarında Uluslararası Elektronik Komisyonun (IEC) önerdiği yüksek verimli elektrik motorları kullanılmalıdır.

Atıksu arıtma tesisinde koagülasyon ve dezenfeksiyon işlemleri için kullanılan kimyasalların her kullanımda optimum dozunun belirlenmesi ve sarfiyatın kısılması CO₂ emisyonun azaltılmasına katkı sağlayacaktır.

Biyogazın verimli üretiminde anerobik tankın optimum işletme şartlarında işletilmesi, oluşan biyogazın miktarı ve kalitesini artıracak, biyogazın yakılması sonucu üretilen elektrik enerjisi ile CO₂ emisyonları azaltılacaktır. İyi işletilen anerobik biyogaz tankı optimum pH, alkalinite ve sıcaklıkta yüksek kalitede biyogaz üretecektir.

Biyolojik faaliyet sonucunda oluşan arıtma çamuru miktarı optimum katyonik polimer ve doğru dekantör işletmesi ile azaltılabilmektedir. Susuzlaştırılan çamurun azaltılmasıyla nakliye ve akaryakıt miktarları azaltılarak CO₂ emisyonu engellenecektir.

Tüm bu önerilerin yanında daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi Muğla Atıksu Arıtma Tesisine ait CO₂ emisyonlarının büyük miktarını evsel atıksuyun arıtılması sonucunda oluşan CO₂ emisyonu oluşturmaktadır. Evsel atıksuyun arıtılması sonucunda oluşan CO₂ emisyonlarının azaltılması için biyolojik faaliyetleri gerçekleştiren mikroorganizma türlerinin daha fazla karbon, azot ve fosforu indirgeyebilecek türlerden seçilmesi hatta laboratuvar ortamında uygun türlerin geliştirilmesi gerekmektedir.

Azotun anerobik ortamda hızla indirgenmesi için anerobik amonyum oksidasyon prosesi (ANAMMOX) ve Planctomycetes türü mikroorganizmalar keşfedilmiştir [22]. Ancak bu tür sadece azot gideriminde aktif olarak rol almaktadır. Laboratuvar ortamında keşfedilecek bir türün aerobik veya anerobik ortamda karbon, azot ve fosforu özel bir besin kaynağına ihtiyaç duymadan atıksuda bulunan kirleticileri tüketerek popülasyonlarını artırıp mevcut mikroorganizma türlerinden daha fazla kirletici gidermesi atıksu arıtma tesisinin CO₂ emisyonlarını azaltacaktır.

Teşekkür

Bu çalışmaya görüşleriyle katkı sağlayan Bilecik Şeyh Edebalı Üniversitesi'nden Yrd. Doç. Dr. Burçin ATILGAN TÜRKMEN'e ve Manchester Üniversitesi'nde ki çalışmaları sonucunda CCalC2 yazılımını ücretsiz olarak kullanıma sunan Prof. Dr. Adisa AZAPAGİC ve ekibine teşekkür ederiz.

Kaynakça

[1] <http://www.ccalc.org.uk/ccalc2.php> (Erişim:16.01.2018).

- [2] NGA 2014. National Greenhouse Accounts Factors. Department of Environment Australian, Government. Commonwealth, 81s.
- [3] IPCC 2006. National Greenhouse Gas Inventories Vol:5 Waste. Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, 149s.
- [4] Mannina, G., Ekama, G., Caniani, D., Cosenza, A., Esposito, G., Gori, R., Olsson, G. 2016. Greenhouse Gases from Wastewater Treatment-A Review of Modelling Tools. Science of The Total Environment, 551, 254-270.
- [5] Kyung, D., Kim, M., Chang, J., ve Lee, W. 2015. Estimation of greenhouse gas emissions from a hybrid wastewater treatment plant. Journal of Cleaner Production, 95,117-123.
- [6] Gustavsson, D., Tumlin, S. 2013. Carbon footprints of Scandinavian Waste Water Treatment Plants. Water Science and Technology. IWA, 68,887-893.
- [7] Gülhan, H., Özgün, H., Erşahin, M. E., Dereli, R.K., ve Öztürk, İ. 2018. İstanbul'da ki Biyolojik Atıksu Arıtma Tesislerinin Sera Gazı Emisyonunun Modellenme Metodu ile Tahmini. Science and Eng. J of Fırat Univ., 30(1), 59-67.
- [8] Arbiogaz A.Ş. 2012. Muğla Atıksu Arıtma Tesisi Proje Raporu. İstanbul, Arbiogaz A.Ş. 124s.
- [9] Gray, N. F. 2004. Biology of Wastewater Treatment. Imperial College Press and Distributed by World Scientific Publishing Co. London, 1421s.
- [10] Bennett, G. F. 1997. Biotechnology for waste and wastewater treatment. Journal of Hazardous Materials, 54(3), 263-264.
- [11] T.C. Resmi Gazete, Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği, 25687, 2004.
- [12] Atılğan, B., Azapagic, A. 2016. An integrated life cycle sustainability assessment of electricity generation in Turkey. Energy Policy, 93,168-186.
- [13] Anonim, 2015, Türkiye İstatistik Kurumu, Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçları, <http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=21507> (Erişim: 30.11.2017)
- [14] Monteith, H. D., Sahely, H. R., MacLean, H. L., Bagley, D. M. 2005. A Rational Procedure for Estimation of Greenhouse-Gas Emissions from Municipal Wastewater Treatment Plants. Water Environment Research, 77(4), 390-403.
- [15] Gupta, D., Singh, S. 2012. Greenhouse Gas Emissions from Wastewater Treatment Plants: A Case Study of Noida. Journal of Water Sustainability, 1(2), 131-140.
- [16] Das, S. 2011. Estimation of Greenhouse Gases

- Emissions from Biological Wastewater Treatment Plants at Windsor, Windsor Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 128s, Windsor.
- [17] Erdoğan, M. 2015. Çevresel Tesislerden Kaynaklanan Sera Gazı Emisyonlarının Hesaplanması, İTÜ, Yüksek Lisans Tezi, 103s, İstanbul.
- [18] Flores-Alsina, X., Corominas, L., Snip, L., Vanrolleghem, P. A. 2011. Including greenhouse gas emissions during benchmarking of wastewater treatment plant control strategies. *Water Research*, 45(16),4700–4710.
- [19] Pachauri, R. K. Ve Reisinger, A. 2007, Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, 104s.
- [20] Anonim, 2016. ABD Çevre Ajansı, Facility Level Information Greenhouse Gases Tool, <https://ghgdata.epa.gov/ghgp/main.do#> (Erişim: 21.12.2017).
- [21] Güller, S. 2018. Muğla Evsel Atıksu Arıtma Tesisi Karbon Ayakizinin Değerlendirilmesi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 90s, Muğla.
- [22] Jetten MS., Niftrik Lv., Strous M., Kartal B., Keltjens JT., Op den Camp HJ., 2009. Department of Microbiology, IWW, 44 (2009), 65-84.