

## Katı Atık Depo Alanlarında Bulunan Atıklardan Biyogaz Enerjisi Üretme Potansiyelinin Değerlendirilmesi; Van İli Örneği

Dilara ÖZTÜRK<sup>1</sup> , Ayşe ÖZGÜVEN<sup>\*1</sup> 

<sup>1</sup>Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 65080, Van, Türkiye

(Alınış / Received: 09.10.2021, Kabul / Accepted: 07.03.2022, Online Yayınlanma / Published Online: 20.04.2022)

### Anahtar Kelimeler

Depo gazı,  
Enerji üretimi,  
Evsel katı atık,  
Van

**Özet:** Bu çalışmanın amacı kentsel katı atık (KKA) bertaraf yöntemleri ve yenilenebilir enerji üretimi için Van ili KKA depolama alanında bulunan atıklardan enerjiye (WTE) dönüşüm teknolojilerinin durumunu yerinde incelemektir. Ayrıca oluşan depo gazını etkileyen parametreleri ortaya koymak amacıyla katı atık karakterizasyonu da yapılmıştır. Atığın %34.34 'ünün organik, %42.41'inin ise sabit madde içerdiği tespit edilmiştir. Ayrıca atığın C/N oranının %31.67 olduğu ve biyogaz üretimi için yeterli olduğu tespit edilmiştir. Depo gazı analiz sonuçlarına göre depo gazının yaklaşık %50-60'ı Metan (CH<sub>4</sub>)' dan oluşmakta ve elde edilen enerji miktarı Ağustos ve Eylül aylarında yaklaşık 3000 kWh civarında iken Kasım ile başlayıp Haziran ayına kadar devam eden soğuk geçen aylarda ise enerji üretim miktarı 2000-3000 kWh aralığına düşmüştür. Depolama alanında biriken CH<sub>4</sub> gazını elektrik enerjisine dönüştürmek için Van Büyükşehir Belediyesi tarafından kurulan elektrik enerjisi üretim tesisi 2019 yılı başında faaliyete girmiştir ve yaklaşık 5000 hanenin enerji talebini karşılamaktadır. Elektrik üretim tesisinde saatte ortalama 2000 kWh elektrik üretimi yapılmakta ve ortalama 1150 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> gazı tesise çekilmektedir. Sıfır atık sistemine tam adaptasyon ile tesisin enerji üretim verimliliğine etki edecek parametrelerden biri olan atık kompozisyonunun biyolojik aktiviteyi sınırlayacak atıklardan arınmış ve CH<sub>4</sub> eldesini artıracak bir yapıda olacağı kanatındeyiz.

## Evaluation of The Potential of Producing Biogas Energy From Wastes in Landfills; Van Province Example

### Keywords

Landfill gas  
Energy production,  
Municipal solid waste,  
Van,

**Abstract:** The aim of this study is to examine on-site the state of waste-to-energy (WTE) conversion technologies for municipal solid waste (MSW) disposal methods and renewable energy production in the MSW landfill of Van province. In addition, solid waste characterization was also carried out in order to reveal the parameters affecting the landfill gas formed. It has been determined that 34.34% of the waste contains organic and 42.41% of it contains fixed substances. In addition, it has been determined that the C/N ratio of the solid waste is 31.67% and it is sufficient for biogas production. According to the results of the landfill gas analysis, approximately 50-60% of the landfill gas consists of Methane (CH<sub>4</sub>), while the amount of energy obtained was about 3000 kWh in August and September, the amount of energy production decreased to the range of 2000-3000 kWh in the colder months starting from November and continuing until June. To convert the methane gas accumulated in the landfill into electrical energy, the electrical power generation facility, established by the Van Metropolitan Municipality, was put into operation at the beginning of 2019 and meets the energy demand of approximately 5000 households. An average of 2000 kWh electricity is produced per hour at the electricity generation facility and 1150 m<sup>3</sup> of methane gas is drawn into the facility. With full adaptation to the zero waste system, we believe that the waste composition, which is one of the parameters that will affect the energy production efficiency of the facility, will be free from wastes that will limit biological activity and in a structure that will increase the production of CH<sub>4</sub>.

## 1. Giriş

KKA üretimi, nüfus artışına paralel olarak kentleşme ve ekonomik gelişme ile birlikte tüketim alışkanlıklarının değişiminin bir sonucu olarak çarpıcı bir şekilde arttığından dolayı önemli çevresel sorunlara neden olmakta ve dolayısıyla KKA yönetimi, dünya çapında büyük bir zorluk haline gelmektedir [1-2]. KKA üretiminin dünya çapında 2025 yılına kadar 2.2 milyar tona ve 2050 yılına kadar ise 4.2 milyara kadar ulaşması beklenmektedir ve KKA yönetimi gelişmekte olan ülkelerdeki belediye yetkilileri için zor bir görevdir [3]. Bunun nedeni, katı atık miktarı ve çeşitliliğindeki artış, oluşan atığın bertarafı için teknolojilerin ve belediye katı atık yönetmeliklerinin yetersiz olmasıdır [4].

Vahşi depolama, katı atıkların gelişi güzel depolandığı, su, toprak ve hava kirliliği gibi pek çok çevresel problemlere neden olan bir yöntemdir [5]. Düzenli depolama ise katı atıkların bertarafı için nispeten basit ve ucuz bir tekniktir. Katı atıkların düzenli depolama alanlarındaki yetersiz yönetimi, katı atıklardan toksik bileşenlerin sızıntı suları birlikte çevresel ortamlara karışmasına (toprak, su ve atmosferin kirlenmesi) ve insan sağlığının olumsuz etkilenmesine neden olmaktadır. Yapılan birkaç çalışmada düzenli depolama alanı civarında yaşayan toplumlarda önemli doğum kusurları ve kanser gibi hastalık risklerinin olduğu belirtilmiştir [6-8]. KKA' lar genel olarak termal dönüştürme, biyolojik arıtma ve depolama gibi üç farklı yöntemle bertaraf edilebilir. KKA' ların termal dönüşümü, KKA hacmini azaltmak ve biyoyakıt oluşturmak için ısı enerjisini kullanmak temeline dayanır. KKA' ların biyolojik olarak bertarafında ortak biyolojik prosedürler kullanılmaktadır ve bu da yalnızca biyolojik olarak parçalanabilen organik materyallerin üzerinde yoğunlaşıldığı anlamına gelmektedir. Katı atıkların düzenli depolanması, endüstrileşmiş ülkelerde ve dünyada en iyi bilinen, uygun maliyetli metotlardan biridir. Günümüzde, düzenli depolama alanlarının, uygun şekilde çalıştırılmaları koşuluyla, doğal olarak tatmin edici bir atık bertaraf yöntemi olması amaçlanabilir. Türkiye'de biyokütle, hidrolik, rüzgâr, güneş, jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynakları için yüksek potansiyele sahip olan enerji kaynaklarının mevcut kullanım oranı çok düşüktür. Bu yenilenebilir enerjiler, fosil yakıt tüketiminin azalmasına neden olabilir.

KKA' lar tarafından sağlanan enerji, özellikle yerel enerji ihtiyaçlarının karşılanmasında büyük bir potansiyele sahiptir. Enerji üretmek için evsel katı atıkların yakılması, çöp sahasına daha az atık gömülmesi anlamına gelir. Ancak bu durum kimyasalların ve malzemelerin havaya salınarak havanın kirlenmesine neden olacaktır. Günümüzde katı atıkların bertarafında enerji potansiyellerinin değerlendirilmesi için farklı teknolojiler geliştirilmekte ve mevcut teknolojilerin iyileştirilmesi için çalışmalar yapılmaktadır. Düzenli depolama

alanları yalnızca atık deposu olarak değil, aynı zamanda önemli yenilenebilir enerji kaynakları olarak da hizmet vermektedir. Düzenli depolama alanları, CH<sub>4</sub> emisyonlarının ana kaynağıdır ve hedeflenen atık yönetimi stratejilerinin, politikalarının ve düzenlemelerinin uygulanması, çöp sahaslarından kaynaklanan CH<sub>4</sub> emisyonlarının azaltılmasına veya enerji uygulamaları için CH<sub>4</sub>'ün yakalanmasına ve kullanılmasına yardımcı olabilir [9]. Dünya çapındaki düzenli depolama alanları, toplam antropojenik CH<sub>4</sub> emisyonlarının %10'unun daha fazlasından sorumludur [10]. Ayrıca, üretilen biyogazın kullanılmasıyla birlikte düzenli depolama, özellikle gelişmekte olan ülkelerde atık yönetiminin önemli bir parçası haline gelmiştir [11-12]. Teknolojinin ilerlemesine bağlı olarak enerji ihtiyacının artması, sınırlı fosil yakıtlar ve enerji ihtiyacında ülkelerin dışa bağımlılığı gibi sorunlar nedeniyle yeni enerji kaynakları arayışları tüm dünyada devam etmektedir. Çakır vd. [13], İzmir ili Harmandalı katı atık depolama sahasında düzenli olarak depolanan belediye katı atıklarından elde edilen elektrik ve potansiyel enerji olarak depolama gazının kullanımını tahmin modelleriyle araştırmışlardır. Singh vd. [14], çalışmalarında ulusal ölçekte çöplüklerden kaynaklanan potansiyel CH<sub>4</sub> emisyon tahmin çalışmaları yapmışlardır. Bu çalışmada, Hindistan'daki düzenli depolama alanlarından yıllık net CH<sub>4</sub> emisyonunun 2015 yılında 1084 Gg olduğunu gözlemişlerdir. Depo gazı, düzenli depolama sahaslarında kentsel katı atıkların anaerobik biyolojik bozunmasının bir sonucu olarak üretilen CH<sub>4</sub> ve karbondioksitten (CO<sub>2</sub>) oluşan sera gazını temsil etmektedir ve CH<sub>4</sub> (%50), CO<sub>2</sub> (%45), azot (N<sub>2</sub>), hidrojen sülfür (H<sub>2</sub>S) ve metan olmayan organik bileşikler (NMOC' ler) (5 %) gibi diğer elementlerden oluşur [15].

CH<sub>4</sub> ve CO<sub>2</sub> gibi tehlikeli olabilecek bazı sera gazlarının atmosfere salınması mümkün olduğunca engellenmeli veya sınırlandırılmalıdır. Bu amaçla gaz toplama sistemleri kullanılmaktadır. Depo gazı, katı atık sahasına açılan ve boru sistemi ile bağlanan birkaç kuyudan oluşan bir sistem kullanılarak toplanır. Depo gazı, bir ısı-enerji kaynağı olarak doğrudan bir kazanda yakılabilir veya bir içten yanmalı motorda veya gaz türbinleri ile elektrik üretimi için kullanılabilir [16-18]. Depo gazı aynı zamanda küresel ısınma etkisine rağmen yüksek CH<sub>4</sub> içeriği nedeniyle yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Bu durum depo gazının hem enerji hem de hammadde üretimi için uygun bir yakıt kaynağı olduğu anlamına gelir [19]. CH<sub>4</sub> toplama sistemi ekonomik olarak verimli olmasa bile, CH<sub>4</sub>'ün doğrudan atmosfere salınmasını önlemek amacıyla kontrollü bir şekilde toplanmalı veya yakılmalıdır. Gaz toplama sistemleri, CO<sub>2</sub> ve diğer sera gazı emisyonlarının azaltılmasına önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Ayrıca bu sistemler, düzenli depolama sahaslarında oluşacak çöp gazı miktarının ve içeriğinin belirlenmesinde de oldukça etkilidir.

Elektrik, kombine ısı ve güç üretimi gibi çeşitli enerji projeleri için depo gazı kullanmak mümkündür. Ayrıca bir ısı-enerji kaynağı olarak doğrudan bir kazanda yakılabilir ve alternatif bir araç yakıtı olarak kullanılabilir. Daha temiz bir yakıt kaynağı olarak depo gazının kullanılması, ozon tabakasına, flora ve faunaya zarar veren kirletici maddeler yayan fosil yakıtların etkisini en aza indirecektir [20]. Çöp gazı AB Direktifi 2009/28/EC' de "temiz yenilenebilir enerji kaynakları" olarak belirtilmiştir [21].

Günümüzde hem sera gazı emisyonlarını hem de enerjinin dışa bağımlılığını azaltmak, ayrıca enerji arzı ve güvenliğini sağlamak için enerji kaynaklarının çeşitliliğini artırmak için düzenli depolama alanlarını ve üretilen depo gazını verimli bir şekilde yönetmek gerekli hale gelmiştir. Türkiye'de düzenli depolama sahalarında evsel katı atıklardan enerji üretimi miktarı her geçen gün artmaktadır. Türkiye'de 2016 yılı sonunda çöp sahalarında elektrik üretimi kurulum kapasitesi 225.369 MWe'dir. Depo gazından enerji geri kazanım projelerinin fizibilitesi, planlaması ve tasarımı ile ilgili en kritik konu, üretilen depo gazı miktarının belirlenmesidir. Elektrik üretiminde depo gazı enerji projeleri için en yaygın kullanılan teknolojiler içten yanmalı motorlar ve gaz türbinleridir.

Bu çalışmada 2020 yılında Van ilindeki vahşi depolama alanına kurulan ana hat gaz toplama kuyusundan aylık olarak kayıt altına alınan depo gazını, bileşenlerini ve bu depo gazının enerjiye dönüşüm oranı incelenmiştir. Oluşan depo gazını etkileyen parametreleri daha net ortaya koymak amacıyla katı atık kompozisyonu ve karakterizasyonu da yapılmıştır. Van ilindeki KKA yönetimi, uygulanan mevcut WTE teknolojisi ile incelenmiştir ve KKA yönetiminde gelecekteki uygulamalar için bazı açıklamalar ve öneriler verilmektedir. Yazarların farkında olduğu kadarıyla Van ili için KKA'nın enerjiye dönüşüm potansiyelini inceleyen ve ortaya koyan bir çalışma yoktur. Bu çalışmadan elde edilen sonuçların CH<sub>4</sub> gazı toplama sistemlerinin tasarlanması ve düzenli depolama sahalarında sera gazı emisyonunun kontrol edilmesi için şehir yetkilileri ve diğer paydaşlar için bir rehber olarak kullanılabilmesi ve ileride yapılacak olan katı atık yönetimi ile ilgili çalışmalara kaynak olabileceği düşünülmektedir. Çalışma Van ilinde bulunan KKA depolama alanında 2020 yılında bir yıllık süre boyunca yapılmıştır. Laboratuvar ve analiz çalışmalarının bir kısmı Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü, Çevre Kimyası laboratuvarında gerçekleştirilmiş, bir kısmı Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilim Uygulama ve Araştırma merkezinde gerçekleştirilmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Çalışma Alanı

Beyüzümü mahallesi, Özalp yolu üzerinde kurulu olan Vahşi depolama sahası, 32.6 hektar alanda 43° 25'

15.4" doğu boylamları ile 38° 32' 46,7" kuzey enlemleri arasında yer almaktadır. Vahşi Depolama alanı Şekil 1' de gösterilmiştir. Van merkez ve civar ilçelerinden günlük yaklaşık 600 ton katı atık girişi olmaktadır. Tesis çalışanlarından edinilen bilgiye göre atıklar belediye tarafından toplanıp vahşi depolama alanına atık transfer araçları ile getirilmektedir. Atıklar büyük çoğunlukla evsel nitelikli olup, işlem görmemiş tıbbi atık girişi yapılmamaktadır. Tıbbi atıklar tesise gelmeden önce tıbbi atık sterilizasyon tesisinde sterilize edilip evsel nitelik taşıdıktan sonra vahşi depolama sahasına getirilmektedir. Tesis yetkililerinden alınan bilgilere göre tesiste 34 personel çalışmaktadır. Tesiste çalışan personel ve vardiya durumuna ilişkin bilgiler aşağıda yer almaktadır.



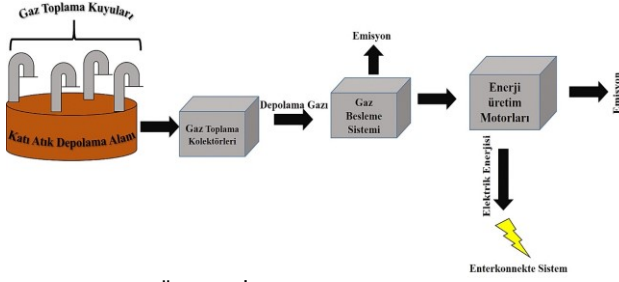
Şekil 1. Vahşi Depolama Alanı

Tesiste Çalışan Personel Sayısı: 34  
Enerji Santralinde Çalışan Personel Sayısı:15  
Vahşi Depolama Alanında Çalışan Personel Sayısı: 19  
Vardiya Sayısı:2 vardiya (8 saat)  
Yıllık Çalışma Süresi: 300 gün

Tesis içerisinde bulunan elektrik üretim sahası 1602 m<sup>2</sup> alanda yer almaktadır. Enerji üretim santrali binası iç görünümü Şekil 2'de gösterilmiştir. Elektrik üretim tesisinde saatte ortalama 2300 kW elektrik üretimi yapılmakta ve ortalama 1150 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> gazı tesise çekilmektedir. Enerji üretimi iş akış şeması Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Enerji Üretim Santrali Binası İç Görünümü



Şekil 3. Enerji Üretimi İş Akış Şeması

## 2.2. Katı Atık Kompozisyonunun Belirlenmesi

Katı atıkların kompozisyonu atıkların alındığı ilçelerin ekonomik durumuna göre değişkenlik gösterdiği için kompozisyonun belirlenmesi işlemi farklı lokasyonlardan gelen atıklarla depolama alanında gerçekleştirilmiş olup ortalama değerleri alınmıştır. Kompozisyonun belirlenmesi işleminde hassas kantar ve araç kantarları kullanılmıştır. Atıkları karıştırmak için naylon branda ve sabit hacimli (1m<sup>3</sup>) bir kap kullanılmıştır. Tartım işlemleri için büyük hacimli (yaklaşık 70 lt) plastik kova kullanılırken, atıkların naylon branda içerisinde homojen karıştırılması için kürek ve tırmık kullanılmıştır. Diğer taraftan kişisel güvenlik önlemleri kapsamında eldiven, maske, çizme, baret ve gözlük kullanılmıştır. Atıklar Van'ı temsil etmesi açısından farklı ilçelerden (İpekyolu, Tuşba, Edremit, Gevaş, Özalp, Muradiye) gelen atık araçlarından analiz yapılacak alana taşınmıştır. Araçlardan analiz yapılacak alan üzerine dökülen atıklar eşit bir şekilde yayılmıştır ve alan her 50 cm' de bir bölüm olmak üzere eşit parçalara bölünerek atıklar her bir bölümden sabit hacimli kaplara alınmış ve ağırlıkları kantarda ölçülmüştür. Tartılan atıklar naylon branda üzerinde yayılarak darası alınan plastik kovalarda atık türüne göre gruplandırılarak hassas kantarda ağırlıkları ölçülmüştür. Kış ayları için yapılan ölçümlerde ısınma atığı olan taban külünün bulunması durumuna karşılık her bir plastik kova tartım esnasında elenerek eleklerin üzerinde kalan atıklar tekrar kovalara alındıktan sonra tekrar tartılarak kül miktarı da kaydedilmiştir.

## 2.3. Nem Tayini, Uçucu Katı Madde ve Sabit Katı Madde Analizi

Çöp depolama sahasından alınan katı atık numuneleri American Society for Testing and Materials Standard Test Metoduna ASTM D5231-92 göre [22] analiz edilmiştir.

## 2.4. Karbon ve Azot Analizi

Sahanın dört farklı noktasından toplanan katı atık numuneleri homojen bir şekilde karıştırılmış, öğütücülerde öğütülmüş ve porselen krozeler yardımıyla etüvde (Mommert Marka, UN110 model) nemi uçurulmuştur (yaklaşık 105°C). Nem'i uçurulan atıklar Thermo Scientific marka Flash 2000 model Elementel analiz cihazı ile analiz edilmiştir.

## 2.5. Depo Gazı Analizi

Anaerobik faaliyetler sonucu oluşan gazın konsantrasyonları enerji santrali giriş hattından ve yerinde BIOGAS 5000 marka cihaz ile ölçülmüştür (Şekil 4). Gaz analizleri toplamda 4 farklı sahadan ve 4 anahat' tan gelen tüm gazların birleştiği Enerji tesisi giriş hattından aylık olarak yapılmıştır. Sahalara ait rigol sayıları Tablo 1'de gösterilmiştir.



Şekil 4. Enerji Tesisi Giriş Ana Hattı

Tablo 1. Ölçüm alanlarına göre rigol sayıları

| Ölçüm Alanı                 | Rigol Sayısı | Anahat sayısı |
|-----------------------------|--------------|---------------|
| 1.Saha                      | 17           | 1             |
| 2.Saha                      | 8            | 1             |
| 3.Saha                      | 12           | 1             |
| 4.Saha                      | 8            | 1             |
| Enerji Santrali Giriş Hattı | -            | 1             |

## 3. Bulgular

### 3.1. Katı Atık Analiz Sonuçları

Katı atık numunelerine ait sonuçlar Tablo 2'de gösterilmektedir. Veriler 3 tekrarlı yapılarak ortalamaları alınmıştır.

Tablo 2. Katı atık analiz sonuçları

| Parametre           | Ağırlıkça bulunma miktarı (%) |
|---------------------|-------------------------------|
| Nem içeriği         | 11.04                         |
| Karbon (C)          | 23.75                         |
| Azot (N)            | 0.75                          |
| C/N                 | 31.67                         |
| Uçucu Madde Miktarı | 42.41                         |
| Sabit Madde Miktarı | 34.34                         |

Anaerobik koşullarda biyogaz oluşumu, atığın uçucu katı madde içeriğine ve biyolojik aktiviteye bağlı olarak geniş bir aralıkta salınır. Tablo 2' de görüleceği üzere ağırlıkça nem içeriği, bağlı karbon, uçucu ve sabit madde yüzdeleri verilmiştir. Toplam katı atığın yaklaşık %42.41'ini temsil eden uçucu katı madde organik muhteviyatı temsil etmekte olup, katı atığın anaerobik ayrışma ile CH<sub>4</sub>' e dönüşme potansiyelinin büyük kısmını göstermektedir. Özellikle C/N oranları CH<sub>4</sub> üretimini etkilemektedir. Depolama alanlarında biyogaz oluşum için optimum C/N oranı genellikle 30-35/1 olarak kabul edilmektedir [23]. İlkılıç ve Deviren

[24] çok yüksek C/N oranında karbonun gaz oluşumunda sınırlayıcı olduğunu, C/N oranının düşük olması durumunda ise azot' un gaz oluşumunda sınırlayıcı olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca düşük C/N durumunda sistemde amonyak oluşumunun gerçekleştiğini ve artan amonyak konsantrasyonunun bakteriler üzerinde toksik etki yaptığını belirtmişlerdir. Tablo 2' de ki verilere göre biyogaz üretimi için C/N oranının yeterli olduğu görülmektedir.

Nem içeriği katı atık depolama tesislerinde olumlu etki gösteren parametrelerden biridir. Nem içeriği biyolojik aktivitenin devamlılığı açısından önemlidir. Azalmış nem miktarı biyokimyasal reaksiyonları olumsuz etkiler. Nem içeriği biyokimyasal reaksiyonu devam ettirmek için kontrol altında tutulmalıdır. Değerlerinin altına düşen nem içeriği durumunda sızıntı suyu yaz aylarında depolama alanı içine geri devredilebilir. Kış aylarında sızıntı suyu sıcaklığı anaerobik bakteriler için uygun olan sıcaklığı düşürebileceği için geri devir önerilmez. Optimum sıcaklık asit bakterileri için 30 °C, metan bakterileri için ise 35–37°C'dir [25].

%34.34 orana sahip sabit katı madde yanmayan, biyolojik olarak parçalanmayan, hafriyat atıkları, taban külü, pil, akü vb gibi atıkları temsil etmektedir. Bu atıkların miktarının azalması kentte sıfır atık sistemine tam adaptasyonun sağlanması mümkün olabilir. Böylece atıklar kaynağında ayrı bir şekilde ayrıştırılarak sadece depo gazı oluşturabilecek potansiyeldeki atıkların tesise gelmesi sağlanmış olacaktır. Türkiye' de yapılan Uşak ili katı atık depolama alanı fizibilite çalışmasında [26] atığa karışan kül (ısınma atığı) miktarı yerinde ayrı toplanıp, ayrı bir şekilde tesise getirildiğinde geri dönüştürülebilir nitelikteki atıkların daha kolay bir şekilde ayrıldıklarını rapor etmişlerdir. Katı atık karakteristikleri incelendiğinde tesise ait geri dönüştürülebilir atık miktarının toplam atık miktarının yaklaşık %18 'ine denk geldiği görülmektedir. Isınma atığı, inşaat hafriyatları, seramik, tehlikeli atıklar gibi organik olarak ayrışamayan atıkların yerinde ayrı toplanıp, ayrı bir şekilde bertaraf edilmesi geri dönüştürülebilir nitelikteki atıkların daha kolay bir şekilde ayrılmasını sağlayabilir. Organik maddelerin CH<sub>4</sub> gazına dönüşmesinde en önemli parametrelerden biri de atığın kompozisyonudur. Katı atık bileşimi, çöp gazı üretim oranını önemli ölçüde etkilemektedir. Yüksek miktarda organik ve gıda atığı, depolama alanında gaz emisyonunun artmasına neden olabilir [27].

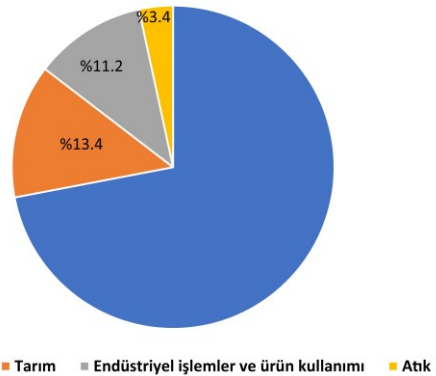
Tesise ait atık kompozisyonu ve bulunma yüzdeleri Tablo 3'de verilmiştir. Şekil 5' de sahadaki atık kompozisyonu görülebilir. Şekil 5' den görüleceği üzere atıkların çoğunluğu poşetler içerisinde yer alan evsel nitelikli atıklar (yiycek atıkları, tekstil atıklar, plastik atıklar) olmakla birlikte inorganik atıklarda mevcuttur. İnorganik atıkların büyük bir çoğunluğunu

ısınma atıkları oluştururken, diğer kısmını ise elektronik, metal, pil gibi atıklar oluşturmaktadır. Şekil 5' de görüldüğü gibi yeşil ve mavi renkli torbalarda evsel ısınma faaliyetleri sonucu oluşan soba külü (taban külü) yer almaktadır.



Şekil 5. Katı atık depolama tesisinde organik atıklar ile karışmış inorganik atıklar

Fosil bir yakıt olan kömürün ısınma ihtiyacının karşılanması için yakılması ile oluşan kül inorganik bir yapıda olup uçucu olmayan sabit katı madde sınıfına girmektedir. Kül yüksek sıcaklıklarda (> 550 °C) yakma işlemi sonucu kaybolmayıp inert bir durumdadır. Katı atık depolama sahaları gibi anaerobik faaliyet ile (organik maddelerin parçalanması sonucu) elde edilen biyogazın değerlendirildiği proseslerde katı atığın organik muhteviyatı CH<sub>4</sub> gazı üretim kapasitesini etkileyen bir faktördür. Organik muhteviyat (Uçucu katı madde) ne kadar yüksek ise CH<sub>4</sub> gazı konsantrasyonunda o oranda artması öngörülür. Elde edilen veriler ışığında inert katı maddenin toplam atığın %34.33' ünü oluşturduğu görülmektedir (bknz. Bölüm 3.2).



Şekil 6. Sektörlere göre sera gazı emisyonu [29]

Ülkemizde, sanayileşme ve hızlı nüfus artışının enerjiye olan ihtiyacı giderek arttırması fosil yakıtların enerji kaynağı olarak kullanılmasına neden olmaktadır. Katı atıkların toplanarak depo alanlarına getirilmesi ve burada bertaraf edilmesi sürecinde büyük miktarda sera gazı emisyonu oluşmaktadır [28]. Sera gazı emisyon envanteri sonuçlarına göre,

2019 yılında 506.1 milyon ton (Mt) CO<sub>2</sub> eşdeğeri olarak hesaplanmıştır. 2019 yılı emisyonlarında CO<sub>2</sub> eşdeğeri olarak en büyük payı %72 ile enerji kaynaklı emisyonlar ve bunu sırasıyla %13.4 ile tarımsal faaliyetler, %11.2 ile endüstriyel işlemler ve ürün kullanımı, %3.4 ile atık takip etmiştir (Şekil 6). Türkiye’de 2019 yılı için kişi başı CO<sub>2</sub> eşdeğer emisyonu 6.1 ton/kişi, sera gazı emisyonu yoğunluğu ise 0.14 kg CO<sub>2</sub> eşd./GSYH (TL) olarak belirlenmiştir [29].

**Tablo 3.** Atık kompozisyonu değerleri

| Atık Bileşenleri   | Ağırlıkça Ortalama Bulunma Miktarı (%) |
|--|--|
| Yiyecek Atıkları   | 44.16                                  |
| Kağıt-Karton   | 6.24                                   |
| Bahçe Atığı  | 2.92                                   |
| Tekstil Atıkları   | 3.08                                   |
| Ahşap Ürün Atıkları  | 0.12                                   |
| Nylon, Plastik ve Lastik (Poşet, pet şişe, ömrünü tamamlamış lastikler vb) | 9.14                                   |
| Cam  | 1.05                                   |
| Tehlikeli Atık (Pil,kimyevi temizlik ürünleri atıkları vb. )               | 1.02                                   |
| Atık Elektronik Eşyalar  | 0.45                                   |
| Metal  | 0.55                                   |
| Kül (Isınma atığı)   | 29.24                                  |
| Diğer İnorganik Atıklar (yanmazlar) (Taş, Seramik vb.)                     | 2.03                                   |
| <b>TOPLAM</b>  | <b>100</b>                             |

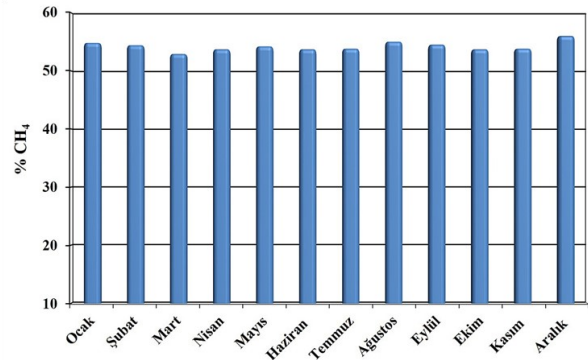
Tablo 3’ten görüleceği üzere atıkların büyük çoğunluğunun yiyecek atıklarından kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Bu tür atıklar hızlı bir şekilde ayrıştığı için CH<sub>4</sub> üretim hızına etkileri de yüksek olmaktadır. Yiyecek atıklarından sonra en yüksek bulunma yüzdesine sahip olan inorganik madde, ısınma atığı olan taban külüdür. Bulunma yüzdelere göre poşet, pet şişe, ömrünü tamamlamış lastikler ve kâğıt- karton atıkları ise sırasıyla %6.24 ve % 9.14 olarak kül atıklarından sonra gelmektedirler. Kış mevsiminde kömür ile ısınan konutlarda ısınma kaynağı olarak kâğıt ve benzeri atıkların da kullanılması ve şehirde kâğıt-karton benzeri ürünleri çöp konteynerlerinden toplayan toplayıcıların olması sebebi ile bu atıkların oranının kentin kâğıt-karton atık potansiyelini tam olarak yansıtmadığı düşünülmektedir. Bir şehrin atık karakterizasyonu ve hatta mahallelerin atık kompozisyonu orada yaşan halkın sosyo ekonomik durumu, barınma ve ısınma şekilleri, coğrafya şartları vb gibi birçok durumdan etkilenebilir. Sakarya ilinin genel atık bileşimini %41 organik atıklar, %10 yanıcı atıklar, %32 geri kazanılan atıklar ve %17’si inorganik atık ve diğer atıklar oluşturmaktadır [30-31]. Polonya da yapılan evsel katı atık kompozisyon çalışmasında genelde atıkların çok fazla kâğıt ve karton içerdiği (ortalama %34.5 kütle), ortalama %6.1 cam, %6.8 plastik ve %8.5 tekstil, %37.8 biyolojik olarak parçalanabilen organik atık ve %1.4 diğer organik bileşenler ve %7.1 mineral bileşenler içerdiği tespit edilmiştir [32].

### 3.2. Depo Gazı Analiz Sonuçları

Depo gazının ana bileşenleri, anaerobik koşullar altında doğal olarak oluşan bakterilerin etkisiyle, genellikle evsel atık biçimindeki organik malzemenin ayrışmasının yan ürünleridir [33]. Biyogaz, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, hava, amonyak, karbon monoksit, hidrojen, kükürt gazları, azot ve oksijenden oluşur. Gaz bacalarının yerleştirilmesindeki problemler, sızıntı ve yağmur suyu drenaj sistemlerindeki aksaklıklar gibi durumlar oluşacak depo gazı miktarlarını etkileyebilir [34]. Van ili vahşi depolama alanındaki depo gazı içeriğinde bulunan gaz bileşenlerinin ortalama hacimsel değerleri Tablo 4’ de verilmiştir. CH<sub>4</sub> ve CO<sub>2</sub> üretilen gaz hacminin yaklaşık %90’ ını oluşturduğu görülmektedir. Depo gazının ana bileşenleri olan CH<sub>4</sub> ve CO<sub>2</sub> ’nin her ikisi de küresel ısınmaya büyük katkıda bulunur. Depolama sahalarının içeriklerinin çok değişken olması nedeniyle, depolama gazlarının bileşenleri büyük ölçüde değişmektedir. Çevreye CH<sub>4</sub> salınımının depo gazı projeleri ile önlenebileceği gibi, elde edilecek olan elektrik enerjisi ile diğer fosil kaynaklı enerji kaynaklarının da kullanımı azaltılmış olacaktır [35].

**Tablo 4.** Van ili depolama alanı depo gazı içeriğinde bulunan bileşenlerinin ortalama hacimsel değerleri

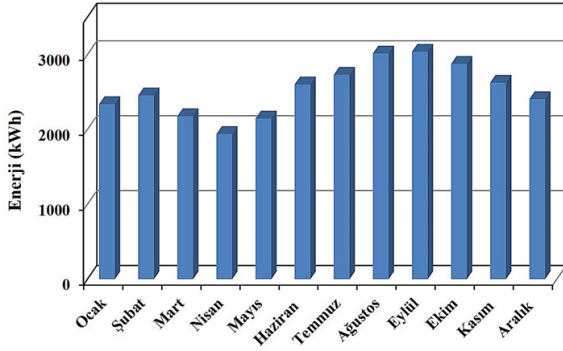
| Bileşen         | Kimyasal Formül  | İçerik        |
|-----------------|------------------|---------------|
| Metan           | CH <sub>4</sub>  | 50-60 (%)     |
| Karbondioksit   | CO <sub>2</sub>  | 30-40 (%)     |
| Oksijen         | O <sub>2</sub>   | <1 (%)        |
| Hidrojen sülfür | H <sub>2</sub> S | 1000-1500 ppm |



**Şekil 7.** Van ili kentsel katı atık enerji tesisinde üretilen depo gazındaki 2020 yılına ait aylık CH<sub>4</sub> içeriği

2020 yılı aylık dağılıma göre depo gazındaki CH<sub>4</sub> yüzdesi Şekil 7’de gösterilmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi, CH<sub>4</sub> ’ün ortalama hacimsel yüzdesi yaklaşık 50-60 arasındadır. Bir ton karışık atık başına Kentsel katı atığın beklenen toplam biyogaz üretim potansiyeli, yaklaşık %50 oranında CH<sub>4</sub> civarındadır [36]. Tablo 4’de ve Şekil 7’ de verilen üretilen CH<sub>4</sub> miktarlarına bakıldığında üretilen CH<sub>4</sub> miktarının %50 civarında seyrettiği anlaşılmaktadır. Akış hızı, çalışma basıncı ve sıcaklık verileri, proses boru hattı boyunca 4 hat ve bir anahat istasyonunda ölçülür. Depo gazının hacimsel akış hızı, ana boru hattı boyunca 29.28 m<sup>3</sup>/dak olarak ölçülmüştür. Tesiste

depo gazındaki H<sub>2</sub>S içeriğinin düşürülmesinden sonra, elektrik üretmek için jeneratörlerle (Leroy Sommers) birleştirilmiş üç adet 1.4 MW Janbacher-4.20 tipi gaz motoruna pompalanmaktadır. Bir motorun çalışma kapasitesi (maksimum üretebileceği enerji) 1414 kWh'dir. Şekil 8, elektrik santralinde kWh cinsinden aylık enerji üretimini göstermektedir. Elektrik üretim tesisinde ortalama 2000 kWh elektrik üretimi yapılmaktadır bu da Van'da yer alan yaklaşık 5000 hanenin enerji talebini karşılamaktadır.



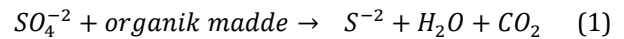
Şekil 8. Van KKA enerji tesisinde 2020 yılına ait aylık enerji üretimi miktarları

Van katı atık vahşi depolama sahasında toplanan KKA' lar dan aylık bazda elektrik üretimi miktarları Şekil 8'de gösterilmektedir. Üretilen elektrik miktarının yaz aylarının dışındaki aylarda çok daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum depolama alanındaki sıcaklıktaki azalma nedeniyle anaerobik bakteriler tarafından CH<sub>4</sub> üretimi için gerekli olan ısının sağlanamamasına atfedilebilir. Öte taraftan CH<sub>4</sub> gazı üretimine, dolayısıyla enerji üretimine etki edebilecek diğer bir parametre ise inorganik atıklardır. Bu inorganik atıklar arasında elektronik atıklar ve piller sayılabilir. As, Cd, Hg gibi ağır metaller metanojenik bakterilerin faaliyetlerini inhibe ederek üretilen CH<sub>4</sub> konsantrasyonuna etki etmektedir. Öztürk [1], Van ilindeki tehlikeli atık potansiyelini belirlediği çalışmada Van ilinde atık elektrikli ve elektronik eşyalar ile pil ve akümülatörler için bir geri dönüşüm tesisin olmadığını belirtmiştir. Ancak bu atıkların elektronik eşya satan firmalar tarafından toplanması, bu atıklar içerisindeki kıymetli malzemeleri ayrıştıran esnafın toplaması ve halkın bilinçlenmesi ile atık toplama kumbaralarının konulması sonucu bu atık materyallerin toplanmasında artış olduğunu belirtmiştir. Tablo 3 incelendiğinde tehlikeli atık (Pil, kimyevi temizlik ürünleri atıkları vb.), atık elektronik eşyalar ve metal atıkların toplam atığın %2.02'ini oluşturduğu görülmektedir. Bu oran düşük olsa da kentte sıfır atık sistemine tam geçişin sağlanması ile tesise gelen inorganik atık miktarı azalmış olacak ve böylece CH<sub>4</sub> gazı miktarı artacaktır. CH<sub>4</sub> oluşumuna pH, sıcaklık, nem, ayrışabilir organik madde miktarı, anaerobik bakterilerin konsantrasyonu, ağır metaller, KOİ vb. gibi başka birçok parametre etki etse de atık kompozisyonu etki eden önemli faktörlerdendir. Ayrıca, kış aylarında gözlemlenen nispeten düşük CH<sub>4</sub> üretimi kış aylarında miktarı artan ısınma amaçlı

kullanılan yakıt atıklarından kaynaklanmış olabilir. Kömürün ısınma amaçlı kullanımı ile ortaya çıkan taban külü Tablo 3'de de görüleceği üzere toplam atıkların %29.24'ünü oluşturmaktadır.

Kömürde sülfat kükürdü magnezyum, kalsiyum, bakır sülfat ve demir tuzları şeklinde ve kristaller biçimde bulunur. Sülfat kükürtlü kömürlerde az miktarda bulunmasına karşın yanma olayı sonrasında yüzeysel bozunmalarla miktarı artabilmektedir. Sülfat kükürdü organik kükürt gibi yanma özelliğine sahip değildir [35]. Kömür içerisinde ayrıca piritik kükürt mevcuttur 550-600 °C'de hızlı bir şekilde bozulan piritik kükürt FeS ve diğer kükürt bileşiklerine dönüşür. Kömürün evsel ısınma amaçlı yanması sonucu oluşan ve atık olarak depo sahasına gelen taban külü sülfat içermektedir [38]. Sülfatların anaerobik ortamda sülfat indirgeyici bakteriler tarafından kullanılarak organik maddeleri ayrıştırması sonucu oluşan kükürdün hidrojen ile reaksiyonu sonucu H<sub>2</sub>S oluşur (Eş. 1-3). Ayrıca sülfat evsel organik atıklardan ve atıksu arıtma tesislerinin çamurlarından kaynaklanabileceği gibi alçıpan gibi malzemelerden de kaynaklanabilmektedir [39]. 2019 yılında yapılan bir çalışmaya göre Van merkezde doğal hattı çekimleri genel olarak tamamlanmış olup ilçelere hat çekilmesi işlemleri devam etmektedir [40]. Bu durum kent halkının ısınma amaçlı doğal gaz kullanımına yönelmesiyle birlikte depolama alanına gelen taban külü miktarının azalacağı anlamına gelmektedir.

Yüksek konsantrasyonlardaki korozif özellikli H<sub>2</sub>S, depo gazının enerji dönüşümü miktarına negatif etki etmektedir. Depo gazı içerisinde bulunan H<sub>2</sub>S, uçucu organometalik bileşikler, merkaptanlar ve yağ motorunun az miktarda yanması sonucunda oluşan parçacıklar yüksek sıcaklık ve basınç altında motor yüzeyinde birikerek motorun çalışma performansını etkilemektedir [41]. Bu durumun bir sonucu olarak enerji üretimi olumsuz etkilenebilmektedir.



Depo gazında bulunan yüksek konsantrasyondaki H<sub>2</sub>S' in giderimi için alternatiflerde mevcuttur. Bunlardan biri biyogaz içindeki CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S gibi gazlar basınçlı su içine absorpsiyonla giderilebilirler [42]. Bu uygulamada CH<sub>4</sub> ile birlikte diğer gazlar da su içerisinde çözünür. CH<sub>4</sub>'ün su içindeki çözünürlüğünün düşük olmasına bağlı olarak az kayıp olur. Bu yöntemle temizlenen gaz, su ile doymun halde olduğundan sıkıştırılmadan veya gaz nakil hattına verilmeden önce kurutulmalıdır [42]. Ayrıca H<sub>2</sub>S Giderimi için başka uygulamalarda mevcuttur. Bunlar; Demir talaş içerisinde biyogazın geçirilmesi, besleme materyaline demir klorür (FeCl<sub>2</sub>) katılması, biyogazın demir oksit paletlerden geçirilmesi ve aktif karbon uygulamalıdır [42]. FeCl<sub>2</sub> beslemesi işleminde

FeCl<sub>2</sub>'nin pahalı olması, reaktör içindeki bakterilerin ölüm riski, klorun korozyona sebep olması, bu uygulamayı sınırlamaktadır [43]. Depo gazının demir yonga içeren toprak içinden geçirilmesi işlemi uygulanması kolay ve ucuz yöntemlerdendir [42].

CH<sub>4</sub> gazı üretimini artıracak diğer bir yöntem ise metan bakterilerinin konsantrasyonunu artırmak ve uygun ortamı sağlamaktır. Bu hususta karbonca zengin organik yük artırılarak depolama sahasında bulunan atıkların bu atıklar ile (hayvan çiftliği, organik endüstriyel atıklar gibi) karıştırılması biyogaz eldesini ve enerji üretimini artırabilir [44].

Elektrik enerjisi cinsinden CH<sub>4</sub> gazının eşdeğeri 10 kWh/m<sup>3</sup> tür [45-46]. Depo gazının %50' sinin CH<sub>4</sub> olduğu kabulüyle, depo gazının enerji eşdeğeri 5 kWh/m<sup>3</sup> alınabilir. Tablo 5' de çeşitli deponi alanı elektrik santrallerinde kWh cinsinden üretilen aylık enerji üretiminin bir karşılaştırılması gösterilmiştir.

**Tablo 5.** Çeşitli deponi alanı elektrik santrallerinde kWh cinsinden üretilen aylık enerji üretiminin karşılaştırılması

| Materyal                    | Çalışma Alanı  | Enerji miktarı (kWh) | Referans          |
|-----------------------------|----------------|----------------------|-------------------|
| Evsel katı atık             | Pakistan       | 1512                 | [47]              |
| Katı atık depo alanı        | Sivas, Türkiye | 2947                 | [48]              |
| Evsel katı atık             | Nijerya        | 5555                 | [49]              |
| Evsel ve tarımsal katı atık | Bangladeş      | 2652                 | [50]              |
| Katı atık depo alanı        | Van, Türkiye   | 2000                 | <b>Bu çalışma</b> |

Şentürk ve Yıldırım [48], Sivas kentsel katı atık enerji tesisinde üretilen depo gazı miktarının elektrik üretimi için kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Üretilen en yüksek enerji miktarının 2030 yılında 2947 kWh olarak tahmin edildiğini ve Sivas çöp gazı santrali' nin işletme ömrünün 2060 yılından sonra ekonomik anlamda neredeyse sona ereceğini gözlemlemişlerdir. Bu nedenle modelleme çalışmalarının yapılmasının belediyelere ve yatırımcılara yol göstermesi açısından önemli olduğunu vurgulamışlardır. Murphy vd. [51], anaerobik çürütme işleminden üretilen 1 m<sup>3</sup> biyogazın, %35 dönüşüm verimliliği ile 2.04 kWh elektrik üretebileceğini bildirmiştir. Mevcut teknolojide 1 m<sup>3</sup> biyogaz 6.7 kWh enerjiye dönüştürülebilmektedir [50].

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Katı atık depolama sahaslarından elde edilen depo gazı ile üretilen elektrik ve ısının belirli bir miktarının ise yenilenebilir enerji yasası kapsamında satılması ve bir miktarının tesisin kendi iç enerjisini temin etmek için kullanılması büyük öneme sahiptir. Böylece düzenli depo alanlarındaki tüm atıkların çevre dostu bir teknoloji ile ülke ekonomisine kazandırılmış olması sağlanacaktır. Bu çalışmada Van merkez ve civar ilçelerinden günlük yaklaşık 600 ton katı atık girişi

olan vahşi depolama tesisine ait ana hat gaz toplama hattından 2020 yılına ait aylık depo gazı analizi ve katı atık kompozisyonu belirlenerek ve katı atık karakterizasyonu yapılarak katı atıklardan enerji eldesine etki eden parametreleri belirlemek ve enerji potansiyelini ortaya koymak amaçlanmıştır. Depo gazı analizi sonuçlarına göre depo gazının yaklaşık %50-60'ı CH<sub>4</sub>'den oluşmakta ve elde edilen enerji miktarı Ağustos ve Eylül aylarında yaklaşık 3000 kWh arasında iken Kasım ile başlayıp Haziran ayına kadar devam eden mevsim şartları itibariyle soğuk geçen aylarda ise enerji üretim miktarı 2000-3000 kWh aralığında düşüş göstermiştir. Bu düşüşlerin sebebinin soğuk geçen aylarda inorganik yanma ürünü atıkların depo alanına gelmesi ve sıcaklık düşüşü sebebiyle CH<sub>4</sub> oluşumunda etkin bakterilerin olumsuz etkilenmeleri ile olduğu düşünülmektedir. Depo alanındaki CH<sub>4</sub> gazının kullanılmasıyla tesiste ortalama 2000 kWh elektrik üretimi yapılmaktadır ve Van'daki 5000 hanenin enerji talebi karşılanmaktadır. Daha fazla depo gazı üretimi için Van ili ve bütün civar ilçelerinden KKA' lar depolama sahasında toplanmalıdır. Van ili için yapımına devam edilen düzenli depolama tesisine geçişle birlikte daha yüksek miktarlarda enerji üretimi olacağı kanaatindeyiz. Enerji üretim miktarına katkı sağlayacak önemli unsurlardan biri olan sıfır atık sistemine tam geçişin sağlanmasıyla birlikte düzenli depolama sahasına getirilen atıkların depo gazı üretiminde görev alan metanojenik bakterileri inhibe edecek türden olmaması, evsel organik atıkların inorganik atıklardan ayrılması daha fazla enerji üretimine neden olacaktır. WTE teknolojilerinden elektrik üretim potansiyeli yalnızca yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretimine katkıda bulunmakla kalmayıp, aynı zamanda depo alanlarının maliyetini ve buna bağlı olarak çevre sorunlarını da azaltacaktır. Nüfus artışı ile birlikte gelecek yıllardaki KKA hacmindeki artış nedeniyle düzenli depolama sahasına bir alternatif olarak diğer WTE teknoloji uygulamaları da düşünülmelidir. Ayrıca bu çalışmada Van ili için katı atık karakterizasyonunun yapılması ve atıkların enerjiye dönüştürülmesi sırasında elde edilen veriler katı atık yönetimi hususunda çalışmak isteyenler için bir kaynak teşkil edecektir.

#### Teşekkür

Yazarlar, çalışmaya katkılarından dolayı Van Büyükşehir Belediyesi'ne ve Çevre Koruma Kontrol ve Katı Atık Şube Müdürü Murat Türü' ye ve Panda Alüminyum A.Ş.' ye teşekkür eder.

#### Etik Beyanı

*Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.*



## Kaynakça

- [1] Öztürk, D. 2019. "Van İlindeki Tehlikeli Atıkların Mevcut Potansiyelinin Belirlenmesi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 34(3), 271-282.
- [2] Ho, W.S., Hashim, H., Lim, J.S., Lee, C.T., Sam, K.C., Tan, S.T. 2017. Waste Management Pinch Analysis (WAMPA): Application of Pinch Analysis for greenhouse gas (GHG) emission reduction in municipal solid waste management. *Applied Energy*, 185, 1481-1489.
- [3] Gu, T., Yin, C., Ma, W., Chen, G. 2019. Municipal solid waste incineration in a packed bed: A comprehensive modeling study with experimental validation. *Applied Energy*, 247, 127-139.
- [4] Fidelis, R., Marco-Ferreira, A., Antunes, L.C., Komatsu, A. K. 2020. Socio-productive inclusion of scavengers in municipal solid waste management in Brazil: Practices, paradigms and future prospects. *Resources, Conservation and Recycling*, 154, 104594.
- [5] Gökçe, G.F., Aydemir, P.K., Hasanoğlu, P., Özbay, M. 2015. Katı Atık Düzenli Depolama Sahalarının ve Vahşi Depolama Alanlarının Islahı ve Bitkilendirilmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 3(1), 258-271.
- [6] Rushton, L. 2003. Health hazards and waste management. *British Medical Bulletin*, 68, 183-197.
- [7] Giusti, L. 2009. A review of waste management practices and their impact on human health. *Waste Management*, 29(8), 2227-2239.
- [8] Hoornweg, D., Bhada-Tata, P. 2012. *What A Waste, A Global Review of Solid Waste Management*, Washington DC, USA: World Bank, 26s.
- [9] Kumar, S., Nimchuk, N., Kumar, R., Zietsman, J., Ramani, T., Spiegelman, C., Kenney, M. 2016. Specific model for the estimation of methane emission from municipal solid waste landfills in India. *Bioresource Technology*, 216, 981-987.
- [10] Tercan, S.H., Cabalar, A.F., Yaman, G. 2015. Analysis of a landfill gas to energy system at the municipal solid waste landfill in Gaziantep, Turkey. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 65(8), 912-918.
- [11] Menikpura, S.N.M., Sang-Arun, J., Bengtsson, M. 2016. Assessment of environmental and economic performance of Waste-to-Energy facilities in Thai cities. *Renewable Energy*, 86, 576-584.
- [12] Tozlu, A., Özahi, E., Abuşoğlu, A. 2016. Waste to energy technologies for municipal solid waste management in Gaziantep. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 809-815.
- [13] Cakir, A.K. Gunerhan, Hepbasli, H.A. 2016. A comparative study on estimating the landfill gas potential: Modeling and analysis. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 38(16), 2478-2486.
- [14] Singh, C.K., Kumar, A., Roy, S. S. 2018. Quantitative analysis of the methane gas emissions from municipal solid waste in India. *Scientific Reports*, 8, 2913,
- [15] Ahmed, S. I., Johari, A., Hashim, H., Mat, R., Lim, J. S., Ngadi, N., Ali, A. 2015. Optimal landfill gas utilization for renewable energy production. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 34(1), 289-296.
- [16] Rada, E. C., Ragazzi, M., Ionescu, G., Merler, G., Moedinger, F., Raboni, M., Torretta, V. 2014. Municipal Solid Waste treatment by integrated solutions: Energy and environmental balances. *Energy Procedia*, 50, 1037-1044.
- [17] Munster, M., Lund, H. 2010. Comparing Waste-to-Energy technologies by applying energy system analysis. *Waste management*, 30(7), 1251-1263.
- [18] United States Environmental Protection Agency (EPA). Landfills, [Online]. Available: [http://www.epa.gov/osw/nonhaz/municipal/c\\_ombustion.html](http://www.epa.gov/osw/nonhaz/municipal/c_ombustion.html) (Date of Access: 20 October 2014).
- [19] Bekkering, J., Broekhuis, A. A., Van Gemert, W. J. T. 2010. Optimisation of a green gas supply chain. *Bioresource technology*, 101(2), 450-456.
- [20] Noor, Z. Z., Yusuf, R. O., Abba, A. H., Hassan, M. A. A., Din, M. F. M. 2013. An overview for energy recovery from municipal solid wastes (MSW) in Malaysia scenario. *Renewable and sustainable energy reviews*, 20, 378-384.
- [21] Can, A. 2020. The statistical modeling of potential biogas production capacity from solid waste disposal sites in Turkey. *Journal of Cleaner Production*, 243, 118501.
- [22] ASTM (American Society for Testing and Materials). 2003. D5231 - 92.
- [23] Bilgili, M. S. 2006. Katı atık düzenli depo sahalarında atıkların aerobik ve anaerobik ayrışması üzerine sızıntı suyu geri devrinin etkileri. *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul*.
- [24] İlkiliç, C., Deviren, H. 2011. Biyogazın Üretimi ve Üretimi etkileyen faktörler. 6 th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 16-18 Mayıs, Elazığ,
- [25] Werner, U., Stöhr, U., Hees, N. 1989. Biogas plants in animal husbandry. *Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien-GATE*.

- [26] Akıncı, G., Onargan, T., Danışman M.A., Küçük, K., Güven, D., Gök, G., Bilgin, M. 2010. Uşak Belediyesi Katı Atık Yönetimi Fizibilite Raporuna Esas Sondajlı Atık Sahası Karakterizasyonu Belirlenmesi ve Gaz Varlığının Araştırılmasına Yönelik Ar-Ge Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Türkiye.
- [27] Hosseini, S. S., Yaghmaeian, K., Yousefi, N., Mahvi, A. H. 2018. Estimation of landfill gas generation in a municipal solid waste disposal site by LandGEM mathematical model. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 4(4), 493-506.
- [28] Demirarslan, K. O. 2020. Katı Atık Yönetiminden Meydana Gelebilecek Sera Gazları ile Matematiksel Tahminleri Üzerine Literatür Araştırması. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8(1), 363-38.
- [29] TÜİK, 2021. Sera gazı Emisyon İstatistikleri, 1990-2019. TÜİK Haber Bülteni, Sayı: 37196.
- [30] Sakarya Valiliği Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, 2015. Sakarya Büyükşehir Belediyesi Entegre Katı Atık Bertaraf Tesisi ÇED Raporu,” Duru Çevre Teknolojileri ve Lab. Hiz Müh. Müş. İnş. Taah. San ve Tic. Ltd. Şti, Ankara.
- [31] Yay, A. S. E. 2017. Yaşam döngüsü analizinin ambalaj atıklarının yönetiminde kullanılması. *Sakarya University Journal of Science*, 21(5), 1008-1017.
- [32] Den Boer, E., Jędrzak, A., Kowalski, Z., Kulczycka, J., Szpadt, R. 2010. A review of municipal solid waste composition and quantities in Poland. *Waste Management*, 30(3), 369-377.
- [33] Demirbas, A. 2006. Biogas production from the organic fraction of municipal solid waste. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 28(12), 1127-1134.
- [34] Çakır, A.K., Gunerhan, H. 2012. İzmir Harmandalı Deposindeki Metan Gazı Potansiyelinin Belirlenmesi, Bertaraf ve Değerlendirme Seçeneklerinin Araştırılması. *TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi*, 53(631), 24-34.
- [35] Öztürk, G. 2010. Katı Atık Yönetimi ve AB Uyumlu Uygulamaları, 3. Baskı, İstanbul, Türkiye: İSTAÇ, 9-62.
- [36] Baran, A., Arıkan, O., Yıldız, Ş., Demir, İ., Sarı, H., Altıntaş, M., Balahorli, V. 2015. Katı Atık Düzenli Depolama Tesisleri İşletimi El Kitabı. İstanbul: İSTAÇ, 5-6s.
- [37] İpekoğlu, R.A.B. 2012. Kömürlerdeki Kükürdün Kademeli Olarak Uzaklaştırılması. *İstanbul Yerbilimleri Dergisi*, 9, 1-2.
- [38] Çağlar, G.A. 2007. Endüstriyel atık malzemelerin karayollarında kullanımı, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi, İstanbul.
- [39] Ko, J. H., Xu, Q., Jang, Y. C. 2015. Emissions and control of hydrogen sulfide at landfills: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45(19), 2043-2083.
- [40] Öztürk, D., Bayram, T. 2019. Van İli Kent Merkezinde Hava Kirliliği. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(3), 1142-1153.
- [41] Sevimoğlu, O., Östürk, Ö. 2019. Kömürçüoda Katı Atık Depolama Sahasında Çöp Gazından Enerji Üretiminde Kullanılan Gaz Motorlarında Oluşan Depozitin Elementel Karakterizasyonu. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(10), 1-9.
- [42] İlkılıç, C., Deviren, H. 2011. Biyogazın Oluşumu ve Biyogazı Saflaştırma Yöntemleri. 6 th International Advanced Technologies Symposium, 16-18 Mayıs, Elâzığ, 150-155.
- [43] Boyd, R. “Internalising Environmental Benefits of Anaerobic Digestion of Pig Slurry in Norfolk, University of East Anglia,” [Online]. Available: <http://www.green-trust.org/%20PigSlurryADProject.pdf> (Date of Access: 14 April 2019).
- [44] Gujer, W., Zehnder, A. J. 1983. Conversion processes in anaerobic digestion. *Water science and technology*, 15(8-9), 127-167.
- [45] Coşkuner, M.C. 2015. Evsel Atıktan Enerji Üretimi: Gaziantep Örneği, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- [46] Cuzin, N., Farinet, J. L., Segretain, C., Labat, M. 1992. Methanogenic fermentation of cassava peel using a pilot plug flow digester. *Bioresource technology*, 41(3), 259-264.
- [47] Korai, M. S., Mahar, R. B., Uqaili, M. A. 2014. Assessment of power generation potential from municipal solid wastes: A case study of Hyderabad city, Sindh, Pakistan. *Pakistan Journal of Analytical & Environmental Chemistry*, 15(1), 10.
- [48] Şentürk, İ., Yıldırım, B. 2020. A study on estimating of the landfill gas potential from solid waste storage area in Sivas, Turkey. *Scientific Journal of Mehmet Akif Ersoy University*, 3(2), 63-76.
- [49] Ibikunle, R. A., Titiladunayo, I. F., Akinnuli, B. O., Dahunsi, S. O., Olayanju, T. M. A. 2019. Estimation of power generation from municipal

solid wastes: A case Study of Ilorin metropolis, Nigeria. *Energy Reports*, 5, 126-135.

- [50] Hasan, A. M., Ammenberg, J. 2019. Biogas potential from municipal and agricultural residual biomass for power generation in Hazaribagh, Bangladesh—a strategy to improve the energy system. *Renewable Energy Focus*, 29, 14-23.
- [51] Murphy, J. D., McKeogh, E., Kiely, G. 2004. Technical/economic/environmental analysis of biogas utilisation. *Applied Energy*, 77(4), 407-427.