

Atf İçin: Efe Şükran, 2022. Günümüzün Sürdürülebilir Enerjisi Kentsel Katı Atıklar ve Türkiye Potansiyeli. İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 12(4): 2396 - 2407.

To Cite: Efe Sukran, 2022. Today's Sustainable Energy, Municipal Solid Wastes, and Turkey Potential. Journal of the Institute of Science and Technology, 12(4): 2396 - 2407.

Günümüzün Sürdürülebilir Enerjisi Kentsel Katı Atıklar ve Türkiye Potansiyeli

Şükran EFE

ÖZET: Organik katı atıklar, biyolojik olarak bozunmakta ve bozunma sonucunda depo gazı olarak da tanımlanan %45-60 oranında metan, %40-60 oranında karbondioksitten oluşan gaz karışımı meydana getirmektedirler. Atıkların ana sebebi olan insanoğlu doğada var olduğu sürece, kentsel katı atıklar da yüksek potansiyelli sürdürülebilir enerji niteliğini taşımakta ve bu çalışmaya konu olmaktadır. Çalışmada kentsel katı atıkların biyolojik bozunma süreçleri, bu süreçlere etki eden parametreler incelenmiş ve 7 farklı bölgeye, 81 şehire sahip olan Türkiye'nin, güncel katı atık potansiyeli 2020 yılı verileri kullanılarak araştırılmıştır. 78.2 milyon nüfusa sahip Türkiye'de, kişi başı günlük ortalama 1.13 kg atık üretildiği ve Belediyeler tarafından bir yılda toplam 32.3 milyon ton yıllık kentsel katı atık toplandığı tespit edilmiştir. Bölgesel dağılımlar incelendiğinde nüfus yoğunluğu en fazla olan Marmara Bölgesinin katı atık miktarının diğer bölgeler arasında en fazla olduğu ve kişi başı ortalama katı atık tüketim oranının da Türkiye ortalamasının üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Türkiye nüfusunun %19.7'sini oluşturan ve en büyük şehir olan İstanbul'da kişi başı günlük ortalama atık miktarının ülke ortalamasının üzerindedir. %45-60 oranında metan gazı içeren depo gazının Türkiye gibi enerjisi dışa bağımlı olan ülkelerde ekonomiye kazandırılması hem enerji kazanımı hem de depo gazlarının doğaya salınımı engellemek açısından önem arz etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Depo gazı, Kentsel katı atıklar, Sürdürülebilir enerji

Today's Sustainable Energy, Municipal Solid Wastes, and Turkey Potential

ABSTRACT: Organic solid wastes are biodegradable then they form a gas mixture consisting of 45-60% methane and 40-60% carbon dioxide, which is also defined as landfill gas. As long as humans, the main cause of waste, exist in nature, municipal solid wastes also carry the quality of high potential sustainable energy and are the subject of this study. In the study, the bio-degradation processes, and the parameters that affect these processes of municipal solid wastes are examined, and the current solid waste potential of Turkey which has 7 different regions and 81 cities, is determined using 2020 data. Turkey, with a population of 78.2 million, has 1.13 kg per person per day average waste and is collected 32.3 million tons of annually municipal solid waste by the Municipalities. Also, the regional distributions are examined. It has been determined that the solid waste amount of the Marmara Region, which has the highest population density, is the highest among other regions and the average solid waste consumption rate per capita is above the average of Turkey. In Istanbul, which is the largest city and constitutes 19.7% of Turkey's population, the average daily waste amount per person is above the country average. Bringing landfill gas containing 45-60% methane gas to the economy in countries like Turkey whose energy is dependent on foreign sources is important in terms of both energy gain and preventing the release of landfill gases to nature.

Keywords: Landfill gas, Municipal solid waste, Sustainable energy

Şükran EFE (**Orcid ID:** 0000-0002-4033-6786), Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye

***Sorumlu Yazar/Corresponding Author:** Şükran EFE, e-mail: sukran.efe@atatuni.edu.tr

Makale 28-29 Mayıs 2022 tarihlerinde Ankara'da düzenlenen "5th International Symposium on Innovative Approaches in Smart Technologies" sözlü olarak sunulmuştur.

GİRİŞ

Atık; üreticisi veya kullanıcısı tarafından çevreye atılan veya bırakılan, kullanılabilir veya kullanılamaz durumdaki, katı, sıvı veya gaz formundaki madde olarak tanımlanmaktadır (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2019). Atık kelimesi Türkiye’de ilk defa 1983 yılında 2872 sayılı Çevre Kanunu ile mevzuata girmiştir (Çevre Kanunu, 1983; Gündüzalp ve Güven, 2016). Kentlerde oluşan atık miktarları nüfus yoğunluğu kadar, bölgesel tüketim alışkanlıklarına da bağlıdır. Literatürde atıklar ile ilgili yürütülen bütün çalışmalarda oluşan atık miktarlarının iklim, nüfus, teknolojik gelişim, bölgesel kalkınma (zenginlik), yaşam stili ve tüketim alışkanlıklarına bağlı olduğu gösterilmiştir (Olisa, et al., 2016; Wowrzeczka, 2021). İçerisinde sıvı ve gaz atıkların bulunmadığı katı atıklar, yapıdaki kimyasallara göre zararlı ve zararsız katı atıklar olarak sınıflandırılırken, atık çeşidine göre; evsel katı atıklar, tıbbi katı atıklar, endüstriyel katı atıklar ve özel katı atıklar olacak şekilde dört ana kategoride incelemek mümkündür (Yılmaz ve Bozkurt, 2010). Endüstriyel atıkları içermeyen kentsel katı atıklar; evsel atıkları, ticari-kurumsal atıkları ve inşaat atıklarını kapsamaktadır (Bilgili, 2020). Kentsel katı atıklar, iyi bir katı atık yönetimi ile kontrol altında tutulabilir (Gündüzalp ve Güven, 2016).

Atık yönetiminin amacı; atıkların çevre ve insan sağlığına zarar vermelerini engellemek, atıkların ülke ekonomisine kazanımını sağlamak, iş istihdamı oluşturmak ve sürdürülebilirliktir (Bilgili, 2020; Brito et al., 2021). En genel olarak tanımlanan atık yönetim piramidinde; önleme, azaltma, tekrar kullanım, geri dönüşüm, enerji geri kazanımı ve atıkların bertaraf edilmesi kademeleri bulunmaktadır (Andriani and Atmaja, 2019; Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2022a; Tezel, 2020). Atık yönetiminin başarılı bir şekilde yürütülebilmesi ve atık maddelerin bozunması sonucu oluşan koku, sera gazı, görüntü kirliliği gibi olumsuz çevresel faktörlerin bertaraf edilebilmesi amacıyla atıkların düzenli depolama alanlarında depolanması gerekmektedir. Düzenli depolama; atıkların bozunmasıyla oluşan gazın ve atık sızıntı sularının atık alanından uzaklaştırılması ve uygun alanlarda depolanmasını kontrollü bir şekilde sağlayan, özel olarak tasarlanmış bölgelerdeki depolama işlemleridir (Çevre ve Orman Bakanlığı, 2010). Düzensiz depolama ise gelişmemiş veya gelişmekte olan ülkelerde uygulanan, çevre ve insan sağlığı açısından çok tehlikeli bir depolama metodu olup, atıkların kontrolsüz bir şekilde rastgele doğaya bırakılmasıdır. Çevre kirliliği, görüntü kirliliği, salgın hastalıklar, böcek-haşere oluşumu düzensiz depolamanın kaçınılmaz sonuçlarıdır (Özel, 2018).

Katı atık yönetiminde, atıkların bertaraf edilmesi amacıyla kompostlaştırma, termal sistem ve biyometanizasyon yöntemleri kullanılmaktadır. Kompostlaştırma metodu, biyolojik ayrışabilen organik atıkların biyolojik kararlı maddeye dönüştürülmesidir. Termal sistem, yanabilen katı atıkların yakılarak kısmen yok edilmesidir. Termal sistem ile bertaraf etmede atıklardan geriye kül ve cüruf kalmakta, proses sonucunda enerji elde edilmektedir. Biyometanizasyon ise atıkların yapısındaki metan gazının kontrollü bir şekilde açığa çıkarılması ve enerji kaynağı olarak kullanılmasıdır (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2014; Gupta, et al., 2018; Altuntaş, 2021; Kemirtlek, 2022).

Depolama alanlarında oluşan bozunma; atıkların fiziksel, kimyasal ve biyolojik bozunmalarından kaynaklanmaktadır. Fiziksel bozunma, maddenin yapısındaki sıvının süzülerek yapıdan ayrılması ve geriye kalan katının özelliğinin değişmesidir. Kimyasal bozunma, çökme-çözünme, hidroliz, iyon değişimi vb. proseslerin sonucunda oluşmaktadır. Biyolojik bozunma ise maddenin yapısında bulunan mikroorganizmaların etkisiyle oluşan oldukça karmaşık bir prosestir (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2022b). Farklı organik maddeler, mikrobiyolojik bakteriler sayesinde bozunarak metan (CH₄) ve karbondioksit (CO₂)’e dönüşür. Bu dönüşüm esnasında oluşan gaz miktarları ve oranları Çizelge 1’de gösterilmektedir (Çelikkaya, 2016; Öztürk, 2017).

Çizelge 1. Organik maddelerin bozunmasıyla oluşan gaz miktarları ve oranları

Organik Madde	Spesifik Gaz Üretimi (l kg ⁻¹)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)
Karbon hidratlar	790	50	50
Lipitler	1 250	68	32
Proteinler	700	71	29

Organik katı atıklar, çeşitli bakterilerin etkisiyle biyolojik olarak çözünmesi sonucunda yapısında %45-60 oranında CH₄ gazı içeren, depo gazı, çöp gazı veya deponi gazı olarak isimlendirilen bir gaz oluşturmaktadır. Depo gazını büyük çoğunluğunu CH₄ ile CO₂, geriye kalan eser miktarını ise diğer gazlar olarak tanımlanan azot (N₂), oksijen (O₂), amonyak (NH₃), sülfür (S₂) gibi gazlar oluşturmaktadır. Depo gazının bileşenleri ve özellikleri Çizelge 2’de sunulmuştur (Akpınar, 2006). Dünyada depo gazından enerji elde etmek amacıyla yapılan projelendirme çalışmalarına 1970’li yılların sonlarında başlanılmış ve çalışmalar 1990’lı yıllara kadar artarak devam etmiştir (EPA, 2020).

Çizelge 2. Depo gazı içeriği ve özellikleri

Bileşen Cinsi	%*	Özellik	Değer
CH ₄ (%)	45-60	Sıcaklık (°C)	68-88
CO ₂ (%)	40-60	Özgül ağırlık (havaya göre)	1.02-1.06
N ₂ (%)	2-5	Nem içeriği	Doygun
O ₂ (%)	0.1-1.0	Isı değeri (kJ m ⁻³)	14 900-20 500
S ₂ (%)	0-1.0		
NH ₃ (%)	0.1-1.0		
H ₂ (%)	0-0.2		
Karbon monoksit (%)	0-0.2		
Diğer bileşenler (%)	0.01-0.6		

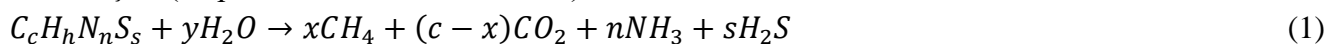
*: Gerçek yüzde dağılımı depolama sahası yaşı ile değişmektedir

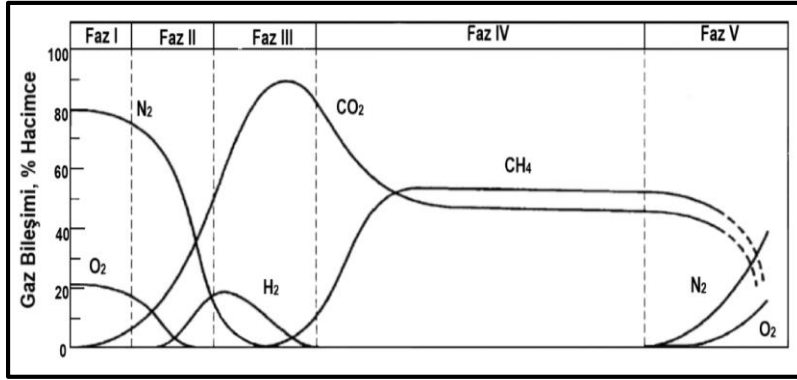
Depo gazı içinde yüksek miktarda bulunan CH₄ ve CO₂, güneş ışığını 28 kat daha fazla absorbe etme kabiliyetine sahip oldukları için küresel ısınmada sorumlu sera gazları arasındadırlar. CH₄ renksiz, kokusuz, zehirli ve patlayıcı etkisi olan bir sera gazıdır. %5-%15 oranında oksijen ile reaksiyona girdiğinde yanma (patlama) tehlikesi vardır. Yapısındaki hidrojen nedeniyle enerji potansiyeli yüksektir ve enerji kaynağı olarak kullanımına yönelik çalışmalar her geçen gün artmaktadır. Atık alanlarında doğal fermantasyon sonucu oluşan CH₄, ortama hava girmesi durumunda O₂ ile karışarak yangın oluşturabildiği için atık alanlarında kontrol altında tutulması gerekmektedir (Şengüler ve Yılmaz, 1994; Öztürk, 2018).

Günümüzde kentsel atıklar belediyeler tarafından toplanarak, çoğunluğu düzenli depolama yapılan alanlarda muhafaza edilmektedir. Bu çalışmada, 2020 Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verileri kullanılarak Türkiye’de her geçen gün artan kentsel katı atıkların güncel potansiyeli incelenmiştir. Katı atıkların bölgesel dağılımı, nüfus ve sanayi gelişmişliği arasındaki ilişki de ele alınmıştır.

MATERYAL ve METOT

Atıkların bozunma işlemi ortamda oksijenin bulunması durumuna göre aerobik ve anaerobik olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleşmektedir. Kademeli bir şekilde birbirini takip eden ve birçok ara reaksiyonun gerçekleştiği fazlar ile bozunma tamamlanmaktadır. Bozunmanın temel reaksiyon denklemi “Eşitlik 1.” ile tanımlanmış (Koçar vd., 2010) ve reaksiyonun gerçekleştiği fazlar Şekil 1’de sunulmuştur (Akpınar, 2006; Yıldırım, 2020).





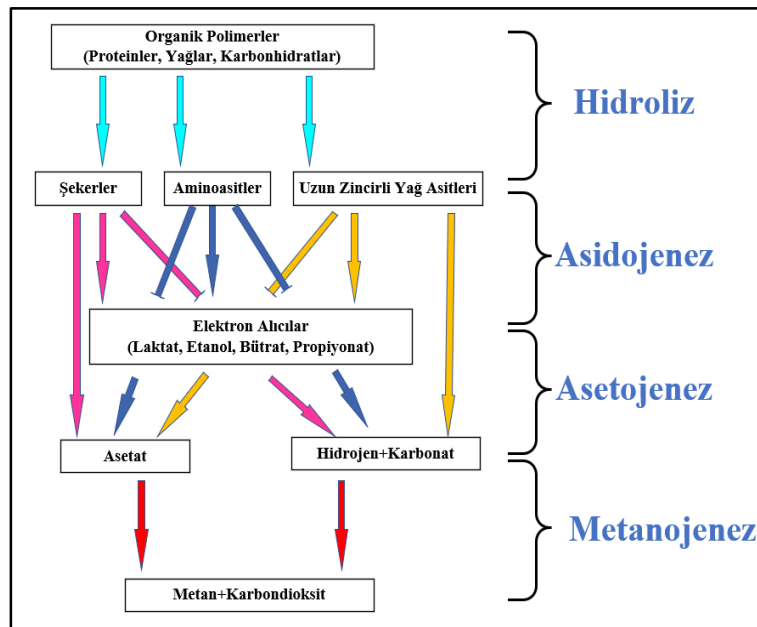
Şekil 1. Atıkların bozunma fazları

Aerobik Bozunma

Depolama esnasında, atıkların içinde ve/veya boşluklarında hapsolan O_2 de atıklar ile birlikte depolanmaktadır. Atığın yapısında bulunan aerobik bakteriler ortamdaki bu oksijeni bitene kadar kullanarak, suda çözünebilir yapıdaki organik maddelerin bozunmasını sağlamaktadır. Bu proses; organik maddelerin ayrışmasına, O_2 'nin CO_2 'e dönüşmesine, depolamadaki ürünlerden suyun süzülmesine ve süzüntü suyunun artmasına neden olmaktadır. Bu aşamada basit şekerler hızla parçalanır, doğal polimerler (lignin, tannin vb.) biyolojik olarak ayrışır, sonuçta CO_2 , NH_3 ve suyun bulunduğu bir karışım elde edilir. Ortam ısısı hızla artarak $60-70^\circ C$ kadar ulaşır (Özkaya, 2005).

Anaerobik bozunma

Ortamda oksijen bulunmaması durumunda gerçekleşen bozunma tipidir. Oksijensiz bozunma, organik maddelerin kademeli bir şekilde bozunarak, CH_4 eldesine kadar devam eden hidroliz fazı, asit fazı ve metan oluşum fazı olmak üzere üç farklı fazda gerçekleşmektedir. Buradaki fazları oluşumu ve süresi; atık içeriğine, depolama şartlarına, tane boyutuna göre farklılıklar göstermektedir. Anaerobik bozunmada gerçekleşen fazların detayları Şekil 2'de gösterilmektedir (Tankılıç ve Topal, 2015).



Şekil 2. Anaerobik faz kademeleri

Hidroliz fazı; bakteriler aracılığıyla uzun zincirli kompleks organik maddelerin (yağ, protein, karbonhidrat, selüloz vb.) daha kısa zincirli küçük maddelere (peptid, aminoasitler, oligosakkaritler, $6C$ 'lu basit şekerler, gliserol, yağ asitleri, pürün, pirimidin vb.) ayrıştırıldığı fazdır. Hidroliz enzimler (proteaz, lipaz, selülaz vb.) diğer enzimlerden farklı olarak koenzimlere ihtiyaç duymazlar. Bu nedenle

sadece sıcaklık ve karıştırma hızının artmasıyla aktiviteleri artmaktadır. Karbonhidratların parçalanması birkaç saat içinde olurken, proteinlerin ve yağların hidrolizi birkaç gün sürmektedir. Hidroliz fazının süresi, metan oluşum süresini direk etkilediği için bu süre ne kadar uzun olursa metan üretimi de o kadar geç olur (Koçar vd., 2010).

Asit fazı; asidojenez ve asetojenez olmak üzere iki farklı alt fazdan oluşmaktadır. Bazı araştırmacılar bu iki fazı birleştirerek tek asit fazı olarak değerlendiriyor olmasına rağmen, ayrı metabolik reaksiyonlar gerçekleştiği için farklı fazlar altında incelemek daha doğrudur. Anaerobik yıkım reaksiyonlarının en hızlı fazı asidojenezdir. Asidojenez de oluşan metabolitler, sonraki adım olan asetojenez veya doğrudan metanojenez fazı için kullanılırlar. Hidroliz fazında oluşan yağ asidi ve alkoller asetat, CO₂ ve H₂ gibi ara metabolitlere fermente olmaktadır. Asidojenez bakterileri için optimum sıcaklık 30°C olmasına rağmen 3-70°C de hızlı bir şekilde üreyebilirler. Ortamda çözünmüş veya bağlı bulunan oksijeni kullandıkları için metanojenik bakterilere uygun ortam hazırlarlar. Asetojenez fazı ise, metan oluşumun gerçekleştiği metanojenez fazı için gerekli substratların oluşumunu sağlar. Bu nedenle önemli bir fazdır. Bu fazda asetat üretilirken H₂, aminoasitler, organik asitler, alkoller, şekerler kullanılır. Asetojenik bakteriler, genel olarak fermantasyon adımından oluşan ara metabolitleri (etanoli laktat, bütirat, benzoat, suksinat ve propiyonat) asetik asit ile H₂'ye çevirir (Bilgili, 2006; Koçar vd., 2010).

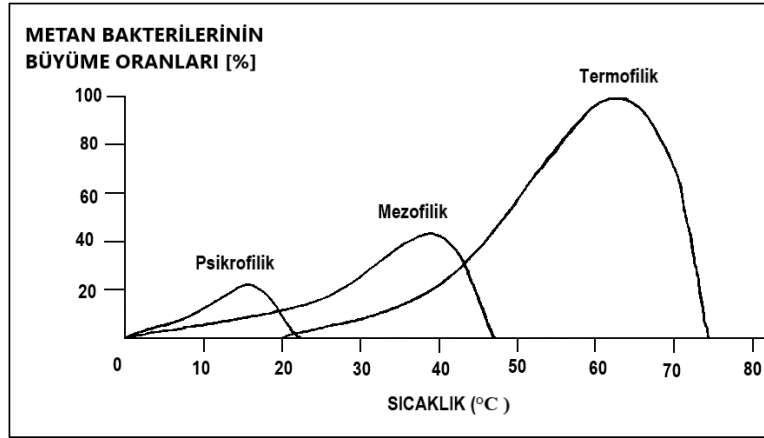
Metajenez olarak da bilinen metan oluşturma fazı; ortamdaki metan bakterilerinin etkisiyle %40-70 oranında metan, %30-60 oranında CO₂ gazının üretildiği, kararlı fazdır. Bu fazda CH₄ üretim hızı zamanla azalmasına rağmen, üretim yaklaşık ortalama 10-20 yıl içinde tamamlanır (Öztürk, 2018). Metanojenik bakteriler, yerüstünde ve sulu ortamlarda, doğal olarak çürümüş organik malzemelerde, derin denizlerdeki volkanik yarıklarda, derin tortularda, gayzerlerde, bataklık ve göllerin kara çamurlarında, hayvan ve insan sindirim ürünlerinde, geviş getiren hayvanların rumenlerinde ve geviş getirmeyen hayvalarında kalın bağırsaklarında bulunur (Koçar vd., 2010).

Depo gazı oluşumuna etki eden faktörler

Depo gazının oluşumuna etki eden birçok parametre olmakla birlikte özellikle sıcaklık, pH, alkalinite, nem miktarı, iklim şartları, depolama şartları, atık yoğunluğu, atık karakterizasyonu, atık yaşı ve atık tane boyutu gazın oluşum hızı ve miktarı üzerinde daha etkin özelliklerdir (Majdinasab et al., 2017).

Metabolik faaliyetlerin sağlanması ve büyümenin gerçekleşmesi için farklı sıcaklıklar gerekmekte olup, sıcaklık metabolik faaliyetlerde görevli olan mikroorganizmalar ve enzimler için çok önemlidir. Anaerobik fermantasyonda optimum gaz miktarı için sıcaklık 3-70°C aralığındadır. Depo gazı oluşumunda sıcaklığın etkisi, metan oluşum fazında (asit oluşum fazına göre) daha etkilidir. Sıcaklık arttıkça gaz oluşum süresi azalmaktadır. Fermantasyon sıcaklığına göre oluşan gaz oranları Şekil 3'de görülmektedir. Fermantasyon sıcaklığına bağlı olarak, fermantasyon süresi de değişmektedir. Psikrofilik, mezofilik ve termofilik reaksiyonlar sırasıyla; 3-20°C arasında, 20-40°C arasında, 40-70°C arasındaki sıcaklıklarda gerçekleşirken, 100-300 gün, 20-40 gün ve bir iki hafta gibi çok daha kısa sürelerde gaz üretimi olmaktadır. Düşük sıcaklıklarda biyogaz içerisindeki metan miktarı daha fazla olmasına rağmen psikrofilik bölge çok düşük yükleme hızları hariç, çok tercih edilen bir çalışma alanı değildir. Yaygın olarak mezofilik bölge tercih edilir. Mezofilik bölge için en optimum sıcaklık 35-37°C'dir. Termofilik bölge, mezofilik bölgeye daha fazla miktarda (1.5-2.5 kat) depo gazı üretir, daha kısa sürede üretir, daha küçük sistem ekipmanlarına (%30) ihtiyaç duyar, yabancı ot-tohum giderimi daha iyidir ancak yüksek miktarda enerji gereksinimi ihtiyaç olması, sistem kontrolünün zorluğu, sistemlerin işletme ve kurulum maliyetlerinin yüksek olması, daha fazla miktarda H₂S üretimi

ve atık gübre kalitesinin düşmesi gibi önemli nedenlerden dolayı fazla tercih edilmez (Koçar vd., 2010).



Şekil 3. Psikrofilik, mezofilik ve termofilik metan bakterilerinin büyüme oranları

pH değeri ortamda bulunan çözülmüş hidrojen iyonu değerini gösterirken, alkanite değeri karışımın pH değerini 4 yapmak için gereken asit miktarını göstermektedir. Mikroorganizmaların davranışları, substratların çözüne bilirliliği ve enzim aktiviteleri pH değerinden önemli miktarda etkilenmektedir. Her bakteri grubu farklı değerdeki pH için optimumdur. Gaz üretimi pH değeri 6.6-7.6 arasında olmasına rağmen metan bakterileri için en uygun pH değeri 6.8-7.2 aralığıdır. pH değerinin 6.2 olması durumunda toksik etki oluşmakta ve 4.5-5.0 aralığında asit bakterileri üretim yapabilmektedir. (Saltabaş ve Yalçın, 2004; Koçar vd., 2010).

Hammaddenin çürüme depolarında veya alanlarında kaldığı zaman, bekleme süresi olarak tanımlanmaktadır. Süre uzadıkça üretilen gaz miktarı da artmaktadır. Atıklardan ilk 2 yılda oluşan gazların yüzdesel dağılımı Çizelge 3’de görülmektedir (Şengüler ve Yılmaz, 1994).

Çizelge 3. Depo gazının aylara göre dönüşüm oranı (%)

Süre (Ay)	CH ₄	CO ₂	N ₂
0-3	5	88	5.2
3-6	21	76	3.8
6-12	29	65	0.4
12-18	40	52	1.1
18-24	47	53	0.4
24-30	48	52	0.2
30-36	51	46	1.3
36-42	47	50	0.9
42-48	48	51	0.4

Depo gazı oluşumu anaerobik fazda gerçekleşir. Ortamda bulunan fazla miktardaki oksijen, aerobik fazın uzamasına ve anaerobik fazın (gaz oluşumunun) gecikmesine neden olacağı için depolama alanlarındaki atıkların üzeri toprak ile kaplanarak gaz oluşumu kontrol altında tutulur.

Depolama alanlarına getirilen katı atıklarda %30-40 oranında nem bulunmaktadır. Nem içeriği fazla olan atıklarda, CH₄ ve CO₂ üretimi daha fazla olacağı için hem kimyasal reaksiyonların tamamlanabilmesi hem de yüksek miktarda depo gazı elde edebilmek amacıyla gerekirse sızıntı suyu depolama alanından, ortama nem ilave edilmelidir (Koçar vd., 2010).

Depolanan atıkların tane boyutunun küçük olması yüzey alanını artıracığı için bakterilerin fermantasyon işlemlerini hızlandırarak gaz çıkış hızını artırmaktadır. Atık boyutunun 250 mm’den

10 mm'ye düşürülmesiyle gaz üretiminin yaklaşık 4.4 kat arttığını gösteren çalışmalar bulunmaktadır (Altuntaş, 2021).

BULGULAR VE TARTIŞMA

Atıklardan elde edilen depo gazının yakıt özelliklerinin, doğalgaz ve kanalizasyon gazı ile karşılaştırılması Çizelge 4'de sunulmuştur (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2014). Depo gazının ısı değerinin, doğalgaz ve kanalizasyon gazının ısı değerinden daha düşük olmasına rağmen, kentsel katı atıkların doğal çözünmesinin sonucunda her halükarda oluşuyor olması, enerji kaynağı olarak önemini ön plana çıkarmaktadır.

Çizelge 4. Metan gazı içeren yakıtların karşılaştırılması

Gaz Bileşimi	Depo Gazı	Doğalgaz	Kanalizasyon Gazı
Metan (CH ₄)	%55*	%90	%65
Karbondioksit (CO ₂)	%45	%0	%35
Azot (N ₂)	%5	%5	%0
Etan (C ₂ H ₆)	%0	%5	%0
Metan Numarası	136	85	134
Isıl değeri (MJ m⁻³)	21	34	25

* Ortamın nem miktarına göre değişir

1 m³ depo gazının diğer yakıtlara göre enerji eşleniği Çizelge 5'de sunulmuştur (Koçar vd. 2010). Fosil kökenli ve/veya yenilenebilirliği düşük olan bu yakıtlar arasında, depo gazı ön plana çıkmaktadır.

Çizelge 5. Depo gazının 1 m³ eşlenik değeri

Yakıt Cinsi	1 m ³ Eşlenik Değeri
Motorin	0.66 l
Benzin	0.75 l
Elektrik	4.70 kWh
Gaz yağı	0.62 l
Odun kömürü	1.46 kg
Odun	3.47 kg
Bütan	0.43 kg

Bir sonraki rapor tarihi 2023 yılı olarak belirlenen Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre; sektörler bazında tanımlanan atık miktarlarının 2018 ve 2020 yılları karşılaştırmalı dağılımı Çizelge 6'da sunulmuştur. 2020 yılında oluşan atık miktarı 2018 yılına göre %10.5 artarak 104.8 milyon ton değerine ulaşmıştır. 2020 yılındaki toplam miktardaki artışa rağmen, teknolojik gelişimin sürekli arttığı Organize Sanayi Bölgelerinde %2.5 ve Termik Santrallerde %6.9 azalma görülmektedir (TÜİK, 2020).

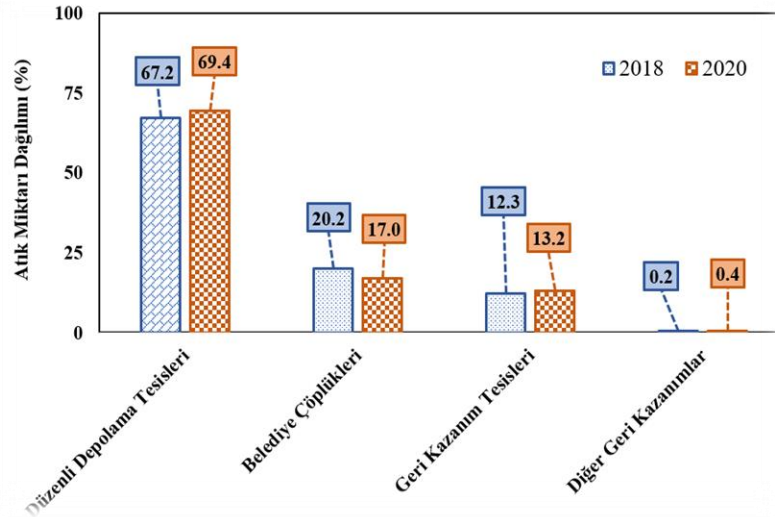
Çizelge 6. Atık miktarlarının 2018 ve 2020 yılları karşılaştırmalı dağılımı

Sektör	Tehlikeli Atık Miktarı		Tehlikesiz Atık Miktarı		Toplam Atık Miktarı	
	2018	2020	2018	2020	2018	2020
İmalat sanayi işyerleri	3 677 320	4 597 274	19 203 824	19 270 593	22 881 144	23 867 866
Termik Santraller	13 805	10 012	26 113 329	24 365 343	26 127 134	24 375 356
Maden İşletmeleri	11 176 581	26 044 730	6 210 448	1 537 144	17 387 029	27 581 875
Org. Sanayi Bölgeleri	111 733	116 720	175 110	162 347	286 843	279 067
Sağlık Kuruluşları	86 916	106 570	2 538	3 113	89 454	109 683
Hane halkı	12 218	1 352	28 086 996	28 633 665	28 099 214	28 635 018
TOPLAM	15 078 573	30 876 658	79 792 245	73 972 206	94 870 818	104 848 864

Not: Toplam değerdeki farklılık yuvarlamadan kaynaklanmaktadır.

Belediye atıklarının bertaraf edilme veya geri kazanım durumuna göre 2018 ve 2020 yıllarının karşılaştırmalı dağılımı Şekil 4'de gösterilmektedir. Türkiye'de 1 387 belediye tarafından toplanan

32.3 milyon ton atığın; %69.4'ü düzenli depolama tesislerinde %17'si belediye çöplüklerinde, %13.2'si geri kazanım tesislerinde ve %0.4'ü ise açıkta yakılarak, gömülerek, dereye veya araziye dökülerek bertaraf edilmektedir (TUİK, 2020).



Şekil 4. Bertaraf etme ve geri kazanım amaçlı toplanan belediye atıklarının yüzdesel dağılımı

Türkiye’de atık bertaraf etme ve geri kazanım tesislerine ait veriler Çizelge 7’de sunulmuştur. Çizelge incelendiğinde; bertaraf etme ve geri kazanım tesislerinde işlem gören 127.4 milyon ton atığın 78.3 milyon tonu bertaraf edilmiş ve 49.1 milyon tonu geri kazandırılmıştır. Türkiye’de 174 adet bulunan düzenli depolama tesisin toplam kapasitesi 1.2 milyar m³ değerinde olup, toplam 77.8 milyon ton atık bertaraf etmiştir (TUİK, 2020).

Çizelge 7. Atık bertaraf etme ve geri kazanım tesis bilgileri

Tesis Tipi	Tesis Sayısı	İşlem Gören Atık Mik. (Ton)
Bertaraf Etme Tesisleri		
Düzenli Depolama Tesisleri	174	77 762 423
Yakma Tesisleri	10	570 980
Toplam	184	78 333 403
Geri Kazanım Tesisleri		
Kompost Tesisleri	9	127 046
Beraber Yakma (ko-insinerasyon) Tes.	50	1 298 579
Diğer Geri Kazanım Tesisleri	2 509	47 642 204
Toplam	2 568	49 067 829
TOPLAM	2 752	127 401 232

Türkiye’nin 2020 yılı kişi başı günlük ortalama atık miktarı 1.13 kg’dır. Belediyeler tarafından toplanan, toplam yıllık atık miktarları Çizelge 8’de sunulmuştur (TUİK, 2022). Atık miktarına göre sıralanan bölgelerin hem nüfus hem de sanayi açısından gelişmişliği söz konusu sıralamada en önemli etken olduğu değerlendirilmektedir.

Belediyelerin toplam atık miktarı en fazla olan 10 şehir için atık verileri Çizelge 9’da sunulmuştur (TUİK, 2022). Şehir sıralamasında toplam atık miktarı ile nüfus miktarının orantılı olmayışının (Ankara ve Bursa ‘da kişi başı atık miktarları daha düşük olması), atık miktarı üzerinde nüfus kadar sanayi gelişimi, bölgesel tüketim alışkanlıkları ve tüketimde eğitim bilincinin etkisini açıkça göstermektedir.

Çizelge 8. Bölgelere göre belediyelerin atık verileri

Bölge	Toplanan Atık Mik. (Ton Yıl ⁻¹)	Atık Hizmeti Verilen Nüfus	Kişi Başı Ort. Atık Mik. (Kg (Kişi-Gün) ⁻¹)
Türkiye	32 324 472	78 204 213	1.13
Marmara	11 459 056	26 718 887	1.17
Ege	4 990 629	10 267 426	1.33
Akdeniz	4 475 641	10 424 269	1.18
İç Anadolu	4 424 265	11 631 798	1.04
Güneydoğu Anadolu	2 945 470	8 390 691	0.96
Karadeniz	2 102 056	5 881 150	0.98
Doğu Anadolu	1 927 356	4 889 993	1.08

Çizelge 9. Toplam belediye atık miktarı en yüksek 10 şehir sıralaması

Şehir (Bölgesi)	Toplanan Atık Mik. (Ton Yıl ⁻¹)	Atık Hizmeti Verilen Nüfus	Kişi Başı Ort. Atık Mik. (Kg (Kişi-Gün) ⁻¹)
İstanbul (Marmara)	6 959 481	15 462 452	1.23
İzmir (Ege)	2 336 954	4 390 284	1.46
Ankara (İç Anadolu)	2 126 019	5 650 525	1.03
Antalya (Akdeniz)	1 318 612	2 527 272	1.43
Bursa (Marmara)	1 167 046	3 101 833	1.03
Konya (İç Anadolu)	920 552	2 235 322	1.13
Mersin (Akdeniz)	818 541	1 855 166	1.21
Adana (Akdeniz)	799 951	2 244 736	0.98
Hatay (Akdeniz)	771 139	1 642 892	1.29
Kocaeli (Marmara)	713 431	1 997 258	0.98

Kişi başı ortalama atık miktarı en yüksek olan 10 şehir için ait verileri Çizelge 10'da sunulmuştur. 81 şehirdeki kişi başı ortalama atık miktarları incelendiğinde, 35 şehirdeki ortalama kişi başı atık miktarının Türkiye ortalamasının (1.13) üstünde olduğu fakat 45 şehirde ise ortalamanın altında olduğu tespit edilmiştir (TUİK, 2022). Çizelge 10'da bulunan en yüksek kişi başı ortalama atık miktarına sahip olan Bartın Şehri, Karadeniz Bölgesinde yer alan, denize kıyısı bulunan küçük bir şehirdir. Sanayisi gelişmiş daha refah şehirlerde ki kişi başı ortalama atık miktarlarının, Çizelge 10'da bulunan bütün şehirlerden daha düşük olması, yaşam standartları ile tüketim bilinci arasında doğru orantılı olmadığını göstermektedir.

Çizelge 10. Kişi başı ortalama atık miktarı en yüksek 10 şehir sıralaması

Şehir	Kişi Başı Ort. Atık Mik. (Kg (Kişi-Gün) ⁻¹)	Toplanan Atık Mik. (Ton Yıl ⁻¹)
Bartın	2.06	77 523
Kilis	1.99	79 403
Kars	1.89	99 666
Muğla	1.86	676 811
Çanakkale	1.85	256 573
Ardahan	1.78	26 596
Burdur	1.75	122 906
Ağrı	1.51	176 084
Şırnak	1.49	211 676
Artvin	1.49	58 062

SONUÇ

Gelişen teknolojinin sonuçlarından biri olan üretim miktarındaki artışlar yüksek dünya nüfusu ile birleşince, her geçen gün artan kişi başı tüketim miktarına ve beraberinde de büyük atık miktarlarına neden olmaktadır. Oluşan atıkların yaşam alanlarından uzaklaştırılması kadar önemli olan diğer hususta bu atıkların çevre ve kişi sağlığı açısından uygun bir şekilde bertaraf edilmesidir. Günümüzde

gelişmiş ülkelerde kullanılan atık yönetim sistemleri ile atıklar yok edilirken, ekonomiye de kazandırılabilmekte ve çevresel zararları engellenmektedir.

Bu çalışmada; Toplam 174 düzenli depolama tesisine sahip olan Türkiye’de hem yüksek nüfus hem de yüksek tüketim alışkanlıkları nedeniyle fazla olan kentsel katı atıkların potansiyelinin belirlenmesi, bu potansiyelin bölgesel dağılımı ve bu dağılım ile nüfus arasındaki ilişki incelenmiştir. Çalışma Türkiye İstatistik Kurumu’na ait 2020 yılı verileri kullanılarak hazırlanmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

✓ “Türkiye’de yıllık toplam 127 401 232 ton atığın %61.5’i bertaraf tesislerinde, geri kalan %38.5 miktar ise atık geri kazanım tesislerinde işlem görmektedir.

✓ 81 şehir ve 922 ilçesi bulunan Türkiye’de toplam 2 752 adet atık tesisinin 184 adedi atık bertaraf amacıyla ve 2 568 adedi atıkların geri kazanımı amacıyla hizmet vermektedir.

✓ Türkiye’de belediyeler tarafından atık hizmeti gören nüfus 78 204 213, yıllık toplanan atık miktarı 32 324 472 ton ve kişi başı günlük ortalama atık miktarı 1.13 kg’dır.

✓ Coğrafi konumu nedeniyle 7 farklı bölgeden oluşan Türkiye’de, sahil şehirlerinin daha fazla gelişmiş ve kalabalık olmasından dolayı, en kalabalık bölgesinin Marmara Bölgesi olup toplam nüfusun yaklaşık %34.1’ine sahiptir. Bu bölgede yıllık atık miktarı (11 459 056) diğer bölgeler arasında en fazladır. Engebeli arazisi nedeniyle en küçük nüfusa sahip bölge Doğu Anadolu Bölgesidir ve en az yıllık atık miktarı da bu bölgede oluşmaktadır.

✓ Marmara Bölgesi, en kalabalık bölge olmasına rağmen, günlük kişi başı atık miktarı en yüksek olan bölge değildir. Günlük kişi başı atık miktarı en yüksek olan bölge, 1.33 kg ile Ege Bölgesidir. Bu farklılık, bölge halkının tüketim bilinci ve alışkanlıklarından kaynaklanmaktadır.

✓ Türkiye’nin en büyük şehri, toplam nüfusun yaklaşık %19.7’sine sahip olan İstanbul’dur. Sanayinin de geliştiği bu şehirde, toplam atık miktarı, Türkiye’nin toplam atık miktarının %21.4’üne sahiptir. İstanbul günlük kişi başı atık miktarı 1.23 olup, Türkiye ortalamasının üzerindedir.

✓ Türkiye atık istatistikleri incelendiğinde, kişi başı günlük atık miktarının 45 şehirde ülke ortalamasının altında olduğu buna rağmen 35 şehirde ise üstünde olduğu görülmektedir. Bu durum söz konusu 35 şehir için kişi başı tüketim miktarlarında iyileştirme yapılması gerektiğini göstermektedir.

✓ Kentsel katı atıklardan düzenli depolama alanlarında elde edilen depo gazının miktarı, iklim koşullarına, atmosfer şartlarına, bölgesel tüketim alışkanlıklarına, atıkların organik yapısına bağlı olarak değişmektedir. Atıklardan depo gazı oluşum miktarı 2 yıl boyunca giderek artmakta ve 2 yıldan sonra azalarak toplam 25 yıllık bir sürede tamamlanmaktadır. Oluşan gaz miktarı, atık merkezlerine sürekli yeni atıkların getiriliyor olması nedeniyle süreklilik sağlamak ve depo gazının sürdürülebilir bir enerji kaynağı haline getirmektedir.

✓ Depolama alanlarından elde edilecek depo gazının miktarını; gaz üretiminin lineer olmayışına, atık merkezlerine sürekli yeni atıkların getiriliyor olmasına, atık içeriklerinin homojen olmayışına, atıklarının bölgesel olarak çeşitlilik göstermesine, iklim şartlarına, atmosfer basıncına vb. birçok parametreye büyük oranda bağlı olarak değiştiği için net bir şekilde hesaplamak mümkün değildir. Ancak literatürde birçok farklı yaklaşık hesap metodu ile yaklaşık olarak hesaplanabilir. Seçilen metodun, söz konusu şartlara en yakın örneklem kümesinden oluşturularak elde edilmiş olmasına dikkat edilmelidir.

✓ Atıkların depolanması sonucu yapılarındaki organik bileşenlerin doğal olarak bozunmaları ile %45-60 oranında CH₄, %40-60 oranında CO₂ gazı içeren depo gazı oluşmaktadır. Sera etkisi yüksek olan bu gazların, hem doğaya salınımını engelleyerek sera gazlarının etkisini azaltmak hem de metanın enerji potansiyelini kullanarak enerji elde etmek amacıyla, atıkların uygun bir şekilde bertaraf edilmesi ve enerjisi kazandırılması ülkelerin ekonomileri için hayati önem arz etmektedir.

KAYNAKLAR

- Akpınar, N. (2006). Kentsel Katı Atıklardan Enerji Üretimi. İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü. Yüksek Lisans Tezi (Basılmış).
- Altuntaş, E. (2021). Düzenli Depolama Sahalarında Depo Gazı (Lfg) Yöntemi Kullanılarak Enerji Eldesi Ve Edirne Uygulamaları. Edirne: Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Yüksek Lisans Tezi (Basılmış).
- Andriani, D., Atmaja, T. D. (2019). The potentials of landfill gas production: a review on municipal solid waste management in Indonesia. *Journal of Material Cycles and Waste Management*(21), 1572–1586. doi:<https://doi.org/10.1007/s10163-019-00895-5>
- 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. (Basılmış).
- Bilgili, M. Y. (2020). Katı Atık Yönetiminde Kullanılan Bazı Kavramlar ve Açıklamalar. *Avrasya Terim Dergisi*, 2(8), 88-97.
- Brito, R. C., Barros, R. M., Santos, I. F., Filho, G. L., Silva, S. P. (2021). Municipal solid waste management and economic feasibility for electricity generation from landfill gas and anaerobic reactors in a Brazilian state. *Environmental Technology & Innovation* (22). doi:<https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101453>
- Çelikkaya, H. (2016). Biyogaz. Fırat Kalkınma Ajansı. https://fka.gov.tr/sharepoint/userfiles/Icerik_Dosya_Ekleri/FKA_ARASTIRMA_RAPORLARI/B%C4%B0YOGAZ.pdf adresinden alındı
- Çevre Kanunu. (1983, Ağustos 11). T.C. Resmi Gazete. Ankara: T.C. <https://www.resmigazete.gov.tr/arsiv/18132.pdf> adresinden alındı
- Çevre ve Orman Bakanlığı. (2010). Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik. Ankara. <https://www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/yonetmelik/7.5.13887.doc> adresinden alındı
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2014). Düzenli Depolama Tesisleri Saha Yönetimi Ve İşletme Kılavuzu. Ankara: Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü. https://webdosya.csb.gov.tr/db/destek/editordosya/Duzenli_Depolama_Tesis_Saha_Yon_ve_isletme_kilavuzu.pdf adresinden alındı
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2019). Sıfır Atık Yönetmeliği. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2019/07/20190712-9.htm> adresinden alındı
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2022a). Atıklar. <https://webdosya.csb.gov.tr/db/bolu/icerikler/atiklar-20180222082452.pdf> adresinden alındı
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2022b). Biyogaz Kılavuzu Üretimden Kullanıma. <https://webdosya.csb.gov.tr/db/cygm/editordosya/biyogaz%20kilavuzu%20pdf.pdf> adresinden alındı.
- EPA. (2020). LFG Energy Project Development Handbook. The Landfill Methane Outreach Program. Retrieved from https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-11/documents/pdh_full.pdf
- Gupta, M., Srivastava, M., Agrahari, S. K., Detwal, P. (2018). Waste to energy technologies in India: A review. *Journal of Energy and Environmental Sustainability*(6), 29-35.
- Gündüzalp, A. A., Güven, S. (2016). Atık, Çeşitleri, Atık Yönetimi, Geri Dönüşüm ve Tüketici: Çankaya Belediyesi ve Semt Tüketicileri Örneği. *Hacettepe Üniversitesi Sosyolojik Araştırmalar E-Dergisi*, 2-15.

- Kemirtlek, A. (2022). Entegre Katı Atık Yönetimi. İstanbul. <https://istac.istanbul/tr/cevre-egitim-merkezi/cevre-makaleleri> adresinden alındı
- Koçar, G., Eryaşar, A., Ersöz, Ö., Arıcı, Ş., Durmuş, A. (2010). Biyogaz Teknolojileri. İzmir: Ege Üniversitesi Basımevi.
- Majdinasab, A., Zhang, Z., Yuan, Q. (2017). Modelling of landfill gas generation: a review. *Rev Environ Sci Biotechnol*(16), 361-380. doi:DOI 10.1007/s11157-017-9425-2
- Olisa, E., Sapari, N., Malakahmad, A., Ezechi, E. H., Riah, A. (2016). Enhancing Lanfill Gas Recovery-A review. *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*(78:5-2), 105-109. Retrieved from ISSN 2180-3722
- Özel, S. (2018). Türkiye’de Deponi Alanlarının Sürdürülebilir Çevre Koruma ve Çevresel Etkilerine İlişkin Bir Değerlendirme. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*(13), 31-38. doi:10.31590/ejosat.394890
- Özkaya, B. (2005). Katı Atık Depo Sahalarında Sızıntı Suyu Geri Devrinin Depo Gazı Bileşenleri Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. *S.Ü. Müh.-Mim. Fak. Derg.*, 20(1). <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/216046> adresinden alındı
- Öztürk, M. (2017). Hayvan Gübresinden Biyogaz Üretimi. Ankara: Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. http://www.cevreshirkutuphanesi.com/assets/files/slider_pdf/UWDntXjXQmfS.pdf adresinden alındı
- Öztürk, M. (2018). Katı Atık Depolama Alanında Depo Gazı Oluşumu. Ankara: Çevre ve Şehircilik Bakanlığı.
- Saltabaş, F., Yalçın, M. A. (2004). Depo Gazından Enerji Üretimi. *SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8(1), 44-47.
- Şengüler, İ., Yılmaz, B. (1994). Çöp Depolama Alanlarında Oluşan Gazın (Deponi Gazı) Çevresel Etkileri Ve Ekonomik Potansiyeli. *Türkiye Jeoloji Mühendisleri Odası Yayını*(44-45), s. 62-66. Türkiye Jeoloji Mühendisleri Odası: https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/ccab9bd9e0b69c4_ek.pdf?dergi.. adresinden alındı
- Tankılıç, T., & Topal, H. (2015). Belediye Atıklarından Düzenli Depolama Sahalarında Biyogaz ve Enerji Üretimi. *Mühendis ve Makina*, 56(669), 58-69.
- Tezel, Ö. (2020). Sürdürülebilir Atık Yönetimi Uygulamalarında Dünya Ve Türkiye Karşılaştırması: Edikab Örneği. *Social Sciences Research Journal (SSRJ)*, 2(9), 35-48.
- TUİK. (2020). Atık İstatistikleri, 2020. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Atik-Istatistikleri-2020-37198#:~:text=At%C4%B1k%20bertaraf%20ve%20geri%20kazan%C4%B1m%20tesislerinde%20i%C5%9Flenen%20127%2C4%20milyon,m3%20olarak%20tespit%20edildi.> adresinden alındı
- TUİK. (2022). Merkezi Dağıtım Sistemi: <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?locale=tr> adresinden alındı
- Wowrzeczka, B. (2021). City of Waste—Importance of Scale. *Sustainability*, 13(3909), 1-14. doi:<https://doi.org/10.3390/su13073909>
- Yıldırım, B. (2020). Depo Gazından Enerji Üretimi ve Bir Örnek Uygulama. Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Yüksek Lisans Tezi (Basılmış)
- Yılmaz, A., Bozkurt, Y. (2010). Türkiye’de Kentsel Katı Atık Yönetimi Uygulamaları ve Kütahya Katı Atık Birliği (KÜKAB) Örneği. *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 15(1), 11-28.