

Evsel katı atıklardan elektrik üretimi: Bursa örneği

Samet ÖZTÜRK*, Harun SEYMENLER, Anıl AKGÜL, Yusuf UCA

¹Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü,
Mimar Sinan Kampüsü, Bursa

Geliş Tarihi (Received Date): 10.10.2023
Kabul Tarihi (Accepted Date): 01.12.2023

Öz

Evsel katı atıklardan yakma yöntemiyle enerji kazanımı yaygınca kullanılan katı atık bertaraf yöntemlerinden biridir. Bu sayede hem atık hacmi önemli ölçüde azaltılmış olur hem de yakma yöntemiyle kazanılan enerji ile elektrik ve ısı eldesi sağlanmış olur. Bu çalışmada dünyada yaygınca uygulaması bulunan evsel katı atık yakma yönteminin Bursa ili için tekno-ekonomik analizi yapılmıştır. Çalışmada Bursa ilinde açığa çıkan evsel katı atık miktarı resmi veriler kullanılarak, potansiyel elektrik enerjisi geri kazanımı hesaplanmıştır. Bu çalışma sonucunda Bursa'da yanabilir evsel katı atıkların ısı değeri 14 MJ/kg olarak hesaplanmış olup, bu atıkların değerlendirildiği bir yakma tesisinin yıllık yaklaşık 25 milyon dolar getir sağlayacağı ve 7,4 yılda tesisin kendini amorti edeceği hesap edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Bursa, atıktan enerji kazanımı, evsel katı atık.

Electricity generation from municipal solid waste: Bursa case

Abstract

In this study Energy recovery from municipal solid wastes by waste-to-energy is one of the most widely used solid waste disposal methods. In this way, both the waste volume is significantly reduced and electricity and heat are obtained with the energy gained by the incineration. In this study, a techno-economic analysis of waste-to-energy method, which is widely used in the world, has been made for the province of Bursa. In the study, the amount of municipal solid waste generated in Bursa province was calculated using the official data, and the potential electrical energy recovery was calculated. As a result of this study, the calorific value of combustible domestic solid wastes in Bursa has been

*Samet ÖZTÜRK, samet.ozturk@btu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-5969-1534>

Harun SEYMENLER, harunseymenler@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5237-099X>

Anıl AKGÜL, anilwrose@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0479-3581>

Yusuf UCA, ucay07111@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0794-6512>

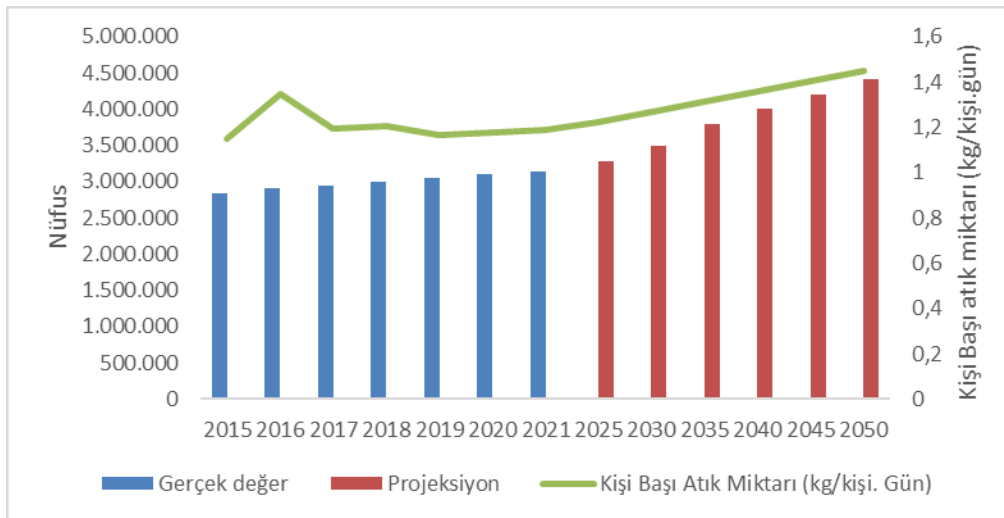
calculated as 14 MJ/kg. Also it is estimated that a waste-to-energy facility where these wastes are evaluated will provide an annual return of approximately 25 million dollars and the facility will pay for itself in 7.4 years.

Keywords: Bursa, energy recovery from waste, municipal solid waste.

1. Giriş

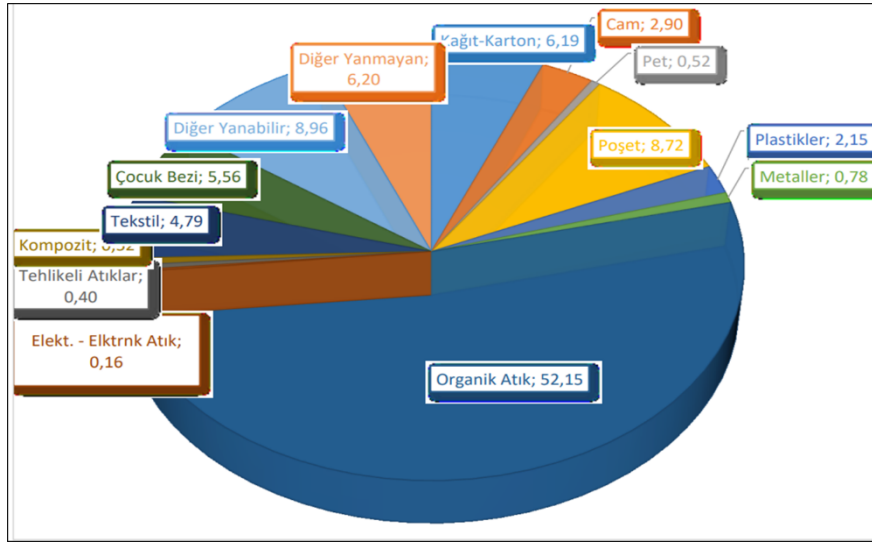
Enerji ihtiyacındaki artış nüfus artışları ve sanayideki gelişmeler nedeniyle ülkelerin kaçınılmaz bir gerçeğidir. Enerji ihtiyacının karşılanması mevcut durumda dünya genelinde ağırlıklı olarak fosil kaynaklardan sağlanmaktadır. Küresel ısınmanın önemli bir sorun olduğunda uzlaşma sağlanması sonrası fosil kaynaklardan uzaklaşma eğilimi artmaktadır. Bunun yanında, evsel katı atıkların geri kazanım yolları kullanılmadan depolama sahalarında bertaraf edilmesi çevresel problemlere yol açmaktadır. Evsel katı atıklar ideal olarak, yalnızca geri dönüşüm ve geri kazanım metotları uygulanamazsa depolama sahalarında gerekli önlemler alındıktan sonra bertaraf edilmelidir [1]. Evsel katı atıkların miktarları nüfusa bağlı olarak seneler içerisinde artış göstermektedir. Aynı zamanda ülkelerin enerji ihtiyacı sanayideki kullanım ve nüfus artışıyla beraber artış göstermektedir. Evsel katı atıkların yakılmasıyla enerji eldesi hem çevresel hem de ekonomik olarak kazanım oluşturmaktadır. Yakılan evsel katı atıkların hacmi ciddi oranda azaltılırken, yakma ile elde edilen enerji kazanımı ısı ve elektrik üretimine katkı sağlamaktadır.

Bursa ili resmi nüfus verileri ve İller Bankası metoduyla oluşturulan nüfus projeksiyonu Şekil 1’de verilmiştir [2-3]. Bursa ilinde 2021 yılı itibarıyla 3 milyonu aşkın nüfus bulunmakla beraber, bu değer 2050 yılında 4,5 milyona yaklaşacağı öngörülmektedir. Bununla beraber, Bursa Büyükşehir Belediyesinin (2015) yapmış olduğu atık karakterizasyonu ve atık gelecek projeksiyonu çalışmasına göre kişi başına düşen ve düşecek olan atık miktarları Şekil 1’de verilmiştir [4]. Kişi başına düşen atık miktarı 2021 yılı itibarıyla 1,2 kg/gün seviyesindedir. Bu değer 2050 yılına gelindiğinde 1,5 kg/gün değerine yaklaşacağı öngörülmektedir. Bu durum mevcut atık bertaraf tekniklerinin gelecekte yetersiz kalabileceğini ve çevresel problemlerin artabileceğini göstermektedir.



Şekil 1. Bursa ili yıllara göre nüfusu ve evsel katı atık miktarı [2-4].

Bursa Büyükşehir Belediyesinin (BBB) (2015) yaptığı evsel katı atık karakterizasyonuna göre evsel katı atıkların %52'si organik atıklardan oluşmaktadır (Şekil 2) [4]. Organik atıkları %9 ile poşet atıkları, %6 ile kağıt-karton atıkları izlemektedir. Dikkat çeken önemli bir oran %6 ile çocuk bezlerine aittir ve onu tekstil atıkları %5 ile takip etmektedir. Kategorizasyonda bir kategori içinde bulunmayan diğer katı atıklardan yanabilir olanları %9, yanmayanlar ise %6'lık bir kısmı oluşturmaktadır. Kompozit atıkları, tehlikeli atıklar ve elektrik-elektronik atıkları %1'den az orana sahip evsel katı atıklardır. Bu çalışmada Bursa ilinde Yenikent depolama sahasında bertaraf edilen İnegöl, İznik ve Yenişehir ilçelerindeki evsel katı atıklar haricindeki tüm ilçelerdeki atığın yakılarak elektrik enerjisi üretilmesinin tekno-ekonomik analizi yapılacaktır. Bahsedilen üç ilçenin kapsam dışı kalmasının nedeni bu ilçelerin diğer ilçelerden lokasyon olarak ayrı bir konumda bulunması ve bu üç ilçede görece çok az miktarda evsel katı atığın açığa çıkıyor olmasıdır.



Şekil 2. Bursa ili evsel katı atık karakterizasyonu [4].

2. Materyal ve Metot

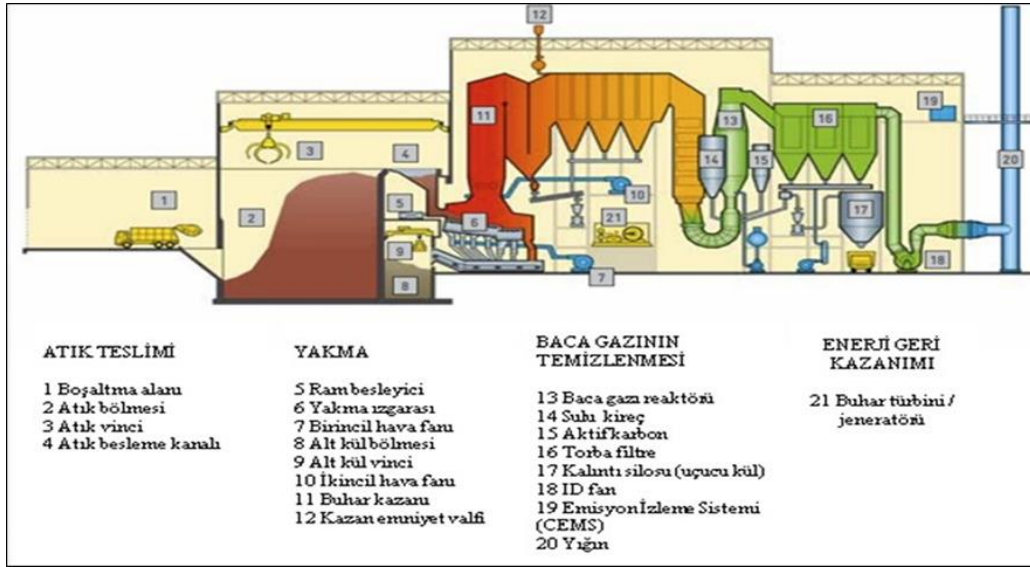
2.1. Bertaraf teknikleri

Evsel katı atıklar düzenli depolama, biyolojik veya termal bertaraf metodları uygulanarak bertaraf edilebilirler. Düzenli depolama dünya genelinde olduğu gibi ülkemizde de en çok uygulanan bertaraf yöntemi olduğu söylenebilir. Düzenli depolama sahalarında evsel katı atıklar ilgili şartlar ve kriterler sağlanarak depolanır [5]. Biyolojik bertaraf metodları kompostlaştırma ve biyometanizasyon olarak iki şekilde uygulanabilir. Kompostlaştırma, organik atıkların kontrollü şartlar sağlanarak biyolojik olarak ayrışması sonucu atık hacminin azaltılmasının ve kullanılabilir minerallerin geri kazanılması işlemidir [6]. Biyometanizasyon işlemi oksijensiz ortamda meydana atıkların parçalanma işlemidir. Biyogaz santralleri biyometanizasyon işleminin kullanılarak elektrik üretildiği enerji üretim tesisleridir [7]. Termal bertaraf teknikleri ise katı atıklara verilen ısı enerjisi ile atıklardan enerji kazanım yöntemleridir. Termal bertaraf teknikleri piroliz, gazlaştırma ve atık yakma yöntemleri olarak kategorize edilebilir [8]. Bu çalışma kapsamında atık yakma yöntemi ele alınmıştır.

2.2. Atık yakma ile enerji kazanımı

Atık yakma yöntemi yanabilir evsel katı atıkların bertarafı için kullanılan bir atık bertaraf yöntemidir. Katı atıkların atık yakma tesislerinde tabi tutuldukları işlemler Şekil 3'te

gösterilmiştir [9]. Atık yakma tesisleri uygulanan işlem bakımından dört kategoride incelenebilir. İlk kısımda atığın tesise teslim edildiği bölüm bulunur. Atık teslimi bölümünde atık boşaltma alanı, atık bölmesi, atık vinci ve atık besleme kanalı bulunmaktadır. İkinci kısımda atığın yakıldığı bölüm olan yakma kısmında ram besleyiciler ile katı atık yakma ızgarasına iletilir ve burada yanma gerçekleştirilir. Buhar kazanı yanmanın etkisiyle oluşan ısı enerjisi sayesinde suyun buharlaştırıldığı bölgedir. Üçüncü kısımda yanma sonucu oluşan baca gazının temizlendiği baca gazı temizleme kısmı bulunur. Buradaki işlemler atık yakma tesislerinde farklılaşabileceği gibi genel olarak hava kalitesi standartlarının sağlanması için baca gazlarının sulu kireç, aktif karbon, torba filtre gibi yardımcı madde ve ekipmanlar vasıtasıyla temizlendiği kısımdır. Son kısımda da buhar enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürüldüğü buhar türbini ve jeneratör bulunur.



Şekil 3. Örnek bir atık yakma tesisinde bulunan kısımlar [9].

Dünya genelinde atıktan enerji kazanımı oldukça yaygın olup, yaklaşık 2500 tane atık yakma tesisinin yılda yaklaşık 420 milyon ton katı atık bertaraf ettiği bilinmektedir [10]. Sadece 2020 yılında yıllık yaklaşık 35 milyon ton bertaraf kapasitesi olan 100'den fazla atık yakma tesisi kurulmuştur [10].

Türkiye'de ise İstanbul ilinde olmak üzere sadece bir adet atık yakma tesisi bulunmaktadır [11]. Bu tesiste günlük 3000 ton, yıllık ise yaklaşık 1 milyon ton evsel katı atık yakılarak bertaraf edilmekte ve elektrik enerjisi üretilmektedir (İBB, 2022). Bunun yanında, Öztürk ve Bourtsalas (2020) tüm Türkiye genelinde atıktan enerji elde etme potansiyelini araştırmış ve Türkiye'deki evsel katı atıkların %50'sinin enerji kazanımı için yakıldığı varsayımıyla senelik 122 milyon dolarlık bir ekonomik kazanım olacağı hesaplanmıştır [12].

Literatürdeki bu çalışmalara karşın Bursa ilinde yapılabilecek bir atık yakma tesisinin tekno-ekonomik analizine rastlanmamıştır. Bursa ili nüfus açısından Türkiye'nin dördüncü en büyük şehri olup potansiyel bir atık yakma tesisi için yatırım yapılabilecek önde gelen şehirlerden biridir. Bu çalışma sayesinde bir atık yakma tesisinin Bursa ilinde gerçekleştirilmesinin yatırıma elverişli olup olmaması ve tesisi için teknik gereklilikler araştırılmış olacaktır.

2.3. Gereç ve yöntem

Bu çalışmada Bursa ili için bir katı atık yakma tesisinin tekno-ekonomik analizi yapılması amaçlanmıştır. Bunun için Büyükşehir Belediyesinin evsel katı atık karakterizasyon değerleri baz alınmıştır [4]. İlk olarak tesiste yakılacak katı atığın kalorifik değeri karakterizasyon baz alınarak hesaplanmıştır. Kalorifik değer hesabı için her bir atık türünün kalorifik değerleri ile yakılacak miktarı çarpılarak ağırlıklı ortalama değeri Denklem 1 kullanarak hesaplanmıştır.

$$C_w = (\sum x_i \cdot y_i) / (\sum y_i) \quad (1)$$

Burada C_w Ağırlıklı kalorifik değer, x_i her bir atık türünün kalorifik değeri ve y_i atık türüne karşılık gelen ağırlık miktarıdır.

Hesaplanan kalorifik değer ile açığa çıkacak saatlik güç miktarı elde edilip bu güç değerine karşılık gelen türbin sayısı hesaplanmıştır. Ayrıca sistemde gerekli olacak su ve buhar kazanları miktarları hesaplanmıştır. İlk yatırım maliyeti literatürde belirtilen yıllık yakılan ton başına atık maliyeti olan ve tesisin inşaatı sırasındaki tüm maliyetleri içeren (baca gazı filtreleme sistemleri dahil) 250\$ kabulü yapılmıştır [13]. Bu değer literatürde bahsedilen gerçekleşen atık yakma tesislerinin ilk yatırım maliyetlerinin ortalama değeri olarak alınmasıyla elde edilmiştir [13]. Ayrıca 2021 yılında İstanbul'da faaliyete başlayan yıllık yaklaşık 1 milyon ton yakma kapasiteli Türkiye'nin tek evsel katı atık yakma tesisinin ilk yatırım maliyeti de 300 milyon Euro olduğu belirtilmiştir [14]. Bu değer tesisin inşaatı için geçerli değer olup yıllık bertaraf edilen ton başına 300 Euro olup bu çalışma için kabul edilen değere yakın olduğu görülmektedir. Böylelikle gerçekleşmiş bir çalışmanın paralelindeki bir değer kabulünün teyiti de böylelikle yapılmıştır. İşçilik harici işletme ve bakım maliyetleri için genel kabul olan ilk yatırım maliyetinin %3'ü uygulanmıştır [15]. Kül ve cüruf atıkları yakılacak atık miktarının %20'sini oluşturacak olup maliyet olarak 2,5\$/ton kabulü yapılmıştır [15]. İşçilik maliyetleri ayrıca hesaplanmıştır. Daha sonra nakit akış diyagramı üzerinden işletmenin geri ödeme süresi hesaplanmıştır. Son olarak, yatırımdan elde edilecek yıllık net kazanç bir karlılık göstergesi olarak Denklem 2-4 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$P_{net} = I_{net} - C_{net} \quad (2)$$

$$I_{net} = I_{atık} + I_{elektrik} \quad (3)$$

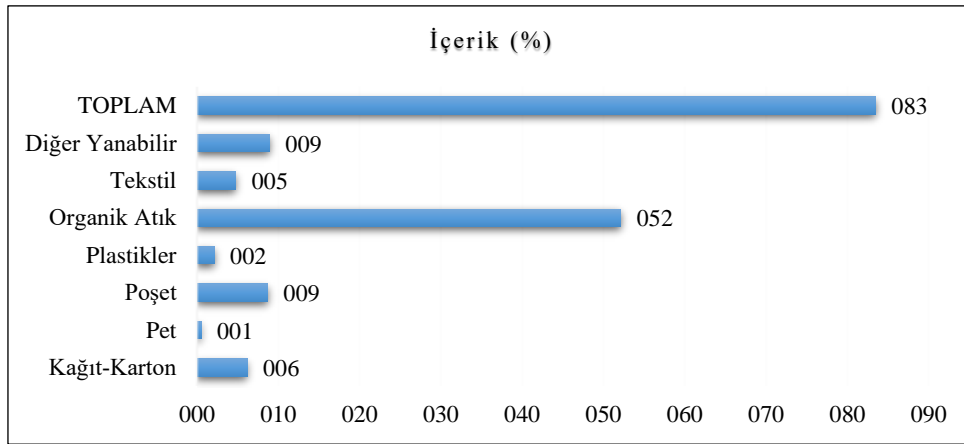
$$C_{net} = Opex + LC + AC \quad (4)$$

P_{net} yıllık net kazanç, I_{net} yıllık net toplam gelir ve C_{net} yıllık net toplam gideri göstermektedir. $I_{atık}$ tesiste atık kabulünden elde edilecek geliri gösterirken, $I_{elektrik}$ ise elektrik üretiminin satışından elde edilecek geliri göstermektedir. Opex yıllık işletme-bakım maliyetini, LC yıllık işçilik maliyetini, AC ise yıllık uçucu kül ve cüruf bertaraf maliyetini göstermektedir.

Böylelikle Bursa ili için evsel katı atıklardan enerji kazanımı için kurulabilecek bir tesisin gerekli teknik özellikleri incelenmiş olup, yatırımı geri ödeme süresi ve yıllık karlılık hesabı yapılarak ekonomik kazanç potansiyeli hesaplanmıştır.

3. Bulgular ve tartışma

Bursa ilinde kurulabilecek bir katı atık yakma tesisine ulaşacak katı atıkların tipine göre yüzdeler oranları Şekil 4'te gösterilmiştir. Buna göre yanabilir olanların tüm evsel katı atıklara oranı %83 olarak bulunmuştur. Yanabilir atıkların en büyük oranını %52 ile organik atıklar, en azını ise %0,52 ile pet atıklar oluşturmaktadır. Poşet atıkları %9, tekstil atıkları ise toplam evsel katı atığın %5'i civarında bir orana sahiptir. Plastikler %2 oranına sahipken diğer yanabilir evsel katı atıklar %9 civarında bir orana sahiptir. Toplamda tesise ulaşan katı atık miktarı günlük 2.010.576 kg'dır. Evsel katı atık tiplerinin oranlarından ve günlük toplam evsel katı atık değerinden hareketle Denklem 1 kullanılarak kalorifik değer hesabı yapılmıştır.



Şekil 4: Bursa ili için yanabilir evsel katı atıklar [4].

3.1. Tekno-ekonomik bulgular

Tablo 1'de katı atık tiplerinin kalorifik değerleri ve Bursa ili için oluşan karışımdaki ortalama saatlik kalorifik değer gösterilmiştir [4, 16]. Tablo 1'e göre en çok kalori değerinin 463 GJ/saat ile poşet atıklarından, en az ise pet atıklarından 26 GJ/saat ile elde edileceği görülmektedir. Tablo 1'e göre ağırlık başına en fazla kalorifik değeri olan evsel katı atıkların pet, poşet ve plastikler olduğu görülmektedir.

Tablo 1. Katı atık yakma tesisinde yakılacak atık tipi ve karşılık gelen enerji miktarları [4, 16].

Katı atık tipi	Kuru Ağırlık (kg/saat)	Enerji (kJ/kg)	Toplam enerji (kJ/saat)
Kağıt-Karton	9.904	16.500	163.416.000
Pet	823	32.500	26.758.333
Poşet	14.243	32.500	462.886.667
Plastikler	3.333	32.500	108.306.250
Organik Atık	34.767	4.500	156.450.000
Tekstil	7.265	17.500	127.134.583
Diğer Yanabilir	13.440	10.500	141.120.000

Tablo 2'de kurulabilecek katı atık yakma tesisi için gerekli buhar kazanı ve su miktarları için ilgili parametrelerin değerleri listelenmiştir. Buna göre Tablo 1'deki farklı tipteki atıkların ortalama enerji değerine karşılık gelen değer Tablo 2'de 14 MJ/kg olarak gösterilmiştir. Daha sonra saatlik yakılan enerji miktarı üzerinden oluşacak buhar miktar değeri yanma verimliliği, verilen ısı miktarı ve suyun buharlaşması için gerekli enerji göz

önünde bulundurularak hesaplanmıştır. Oluşan buhar için bir buhar kazanının kapasitesi 150 ton/saat olarak alındığında 3 buhar kazanının ve 419.967 litre suyun gerekli olduğu gösterilmiştir.

Tablo 2. Katı atık yakma tesisi için gerekli buhar kazanı ve su miktarları.

Parametre	Değer	Birim
Enerji (kj/kg)	14.157	kj/kg
Saatlik yakılan atığın enerji miktarı (kj/saat)	1.186.071.833	kj/saat
η_{yanma} %	80	%
Yanma boyunca verilen ısı miktarı (kj/saat)	948.857.466	kj/saat
1 kg suyun buharlaşması için gerekli enerji	2.259	kj/kg
Oluşacak buhar	419	ton/saat
1 adet buhar kazanı kapasitesi (t/h)	150	ton/saat
Gerekli buhar kazanı	3	adet
Gerekli su miktarı	419.967	L/saat

Tablo 3'te katı atık yakma tesisinde gerekli olacak türbin sayısı için ilgili parametreler ve karşılık gelen değerler listelenmiştir. Buna göre, literatürde belirtildiği üzere türbin verimliliği %12 alınarak saatlik net üretilecek enerji kilojoule birimi cinsinden belirtilmiştir [17]. Daha sonra bu değer MW cinsinden yazıldıktan sonra belirlenen türbin kapasitesine bölünerek toplam gerekli türbin sayısı 2 adet olarak hesaplanmıştır.

Tablo 3. Katı atık yakma tesisi için gerekli türbin sayısı.

Parametre	Değer	Birim
η_{toplam} (%)	12	%
m_{net} (kg/saat)	83.774	kg/saat
W_{net} (kj/saat)	142.328.620	kj/saat
W_{net} (MW)	39	MW
1 adet türbinin ortalama güç çıkışı	20	MW
Gerekli türbin sayısı	2	adet

Son olarak maliyet ve gelir değerleri Tablo 4'te listelenmiştir. Buna göre tesisin ilk yatırım maliyeti yaklaşık 183,5 milyon dolar, işletme ve bakım maliyetleri yıllık yaklaşık 4 milyon dolar, işçilik maliyetleri yıllık yaklaşık 413 bin dolar ve kül bertaraf maliyeti yıllık 7514 dolar olarak hesaplanmıştır. Buna karşılık, atık yakma tesisinde bertaraf edilmesi istenen atığı getiren şirketin ödeyeceği "gate fee" adı verilen atık kabul etme ücreti birim değeri olarak literatürde 12\$/ton-45\$/ton arasında değiştiği belirtilmiş olup bu çalışma için \$16,5/ton kabulü yapılmıştır [15]. Ayrıca, atık yakma tesisinde üretilecek elektrik enerjisinin satılmasıyla elde edilecek yıllık gelir de Tablo 4'te gösterilmiştir. Üretilen elektrik enerjisi santral kapasitesinin tam kapasite çalışması kabulüyle hesaplanan elektrik enerjisine karşılık gelmektedir. Elektrik satış bedeli güncel 2022 biyokütle tesisleri için geçerli olan tarife olan 50 krş/kWh alım garantisi üzerinden hesaplanmıştır [18]. Tesiste yıllık elektrik üretim miktarının 350.400 MWh olması beklenmektedir. Buna göre toplanacak atık gelirinden 22,2 milyon dolar ve elektrik satış gelirinden yaklaşık 10,5 milyon dolar olmak üzere yıllık 32,7 milyon dolar gelir elde

edilebileceği hesaplanmıştır. İşletme-bakım, işçilik ve kül bertaraf maliyetlerinin de yıllık tutarı yaklaşık 7,8 milyon dolardır.

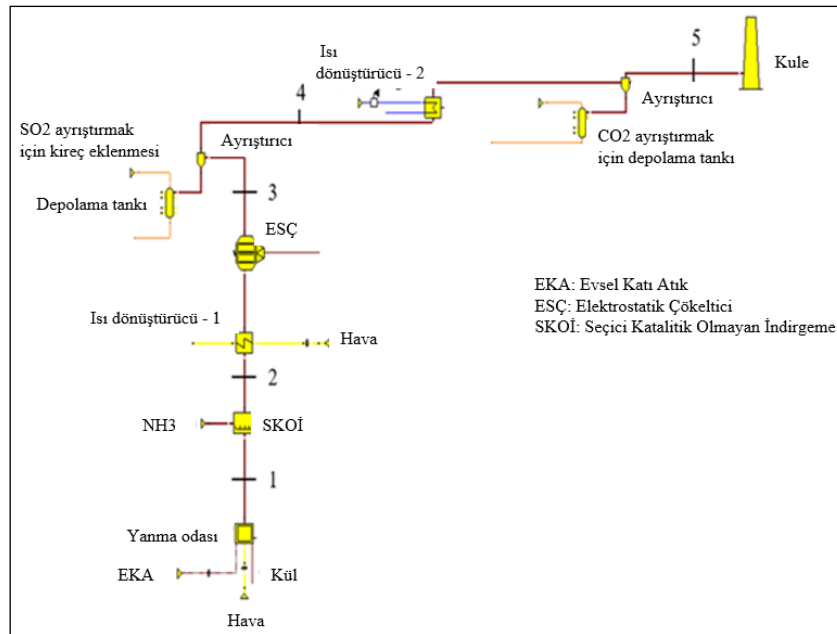
Böylelikle, Bursa ilinde kurulabilecek bir atık yakma tesisinin maliyet ve gelirlerinden yola çıkarak yıllık net karlılığı 25 milyon dolar olarak belirlenmiştir. Herhangi bir enflasyon ve degradasyon etkisi göz önünde bulundurulmaksızın bu tesisin geri ödeme süresi de 7,4 yıl olarak belirlenmiştir.

Tablo 4. Katı atık yakma tesisinin maliyet ve gelir değerleri.

Maliyet/Gelir kalemleri	Miktarı
Tesisin İlk Yatırım Maliyeti (\$)	183.465.060
İşletme-Bakım Maliyetleri (İlk Yatırım Maliyetinin %3'ü kabul edilmiştir.) (\$/yıl)	5.503.952
İşçilik maliyetleri (\$)	412.911
Kül Bertaraf Maliyeti (\$/yıl)	1.835.038
Toplanacak Atık Geliri (\$/yıl)	22.155.578
Elektrik Satış Geliri (\$/yıl)	10.547.210
Net Gelir (\$/yıl)	24.950.887
Amortisman süresi (yıl)	7,4

3.2. Çevresel önlemler

Katı atık yakma tesislerinde atığın yanması sonucu açığa çıkan gazların ve oluşan külün olumsuz çevresel etkilere sebep olmaması için çeşitli önlemler alınması gerekmektedir. Şekil 3'te gösterildiği gibi tipik bir atık yakma tesisinde baca gazının temizlenmesi için baca gazı reaktörü içerisinde aktif karbon ve kireçle kimyasal olarak ve torba filtre içerisinde de fiziksel olarak baca gazının miktarı ve içeriği çevresel kriterlere uygun hale getirilmektedir. Şekil 5'te bir atık yakma tesisindeki baca gazı reaktörü şeması gösterilmiştir. Buna göre 5 noktada açığa çıkan gazların reaksiyonlar sonucu miktarları azaltılmaktadır.



Şekil 5. Atık yakma tesisinden çıkacak gazlar için temizleme aşamaları [19].

Tablo 5'te Bursa ilinde kurulabilecek bir atık yakma tesisinden çıkacak gazların yaklaşık ağırlık değerleri ve 5 noktadaki miktarları listelenmiştir. Bir ve iki noktaları arasında NO₂ miktarı amonyak katılmasıyla azaltılmaktadır. İki ve üç noktaları arasında baca gazı sıcaklığı azaltılmaktadır. Üç ve dört noktaları arasında SO₂ ve HCl miktarları kireç ilavesiyle azaltılmaktadır. Dört ve beş noktaları arasında baca gazı sıcaklığı ve CO₂ miktarı azaltılmaktadır.

Tablo 5. Bursa atık yakma tesisinde baca gazı azaltımı için öngörülen değerler.

Ölçüm Noktaları	Katı Atık Miktarı (kg/s)	Hava Akışı (kg/s)	Hava Sıcaklığı (°C)	Baca Gazı (m ³ /s)	Baca Gazı Sıcaklığı	CO ₂ Emisyonu (mg/Nm ³)	NO ₂ Emisyonu (mg/Nm ³)	SO ₂ Emisyonu (mg/Nm ³)	HCL Emisyonu (mg/Nm ³)
1	25	51	120	310,5	1.146	258.514	749,9	890	717
2	25	51	120	310,5	1.146	258.514	180	890	717
3	25	51	120	137,4	325	258.514	180	890	717
4	25	51	120	137,4	325	258.514	180	44	7,2
5	25	51	120	85,0	129	6.024	180	44	7,2

Katı kalıntı olarak yanma sonrası oluşan uçucu kül ise kalıntı silosunda biriktirilmekte, depolama sahalarında bertaraf edilmekte veya ve daha sonra başka bir malzeme için hammadde olarak kullanılabilir. Örnek olarak beton, karo gibi yapı malzemelerinin içerisinde hammadde olarak kullanılabilir [20]. Şekil 6 bir atık yakma tesisinin uçucu küllerinin kullanıldığı seramik karoların bir örneği gösterilmektedir.



Şekil 6. Atık yakma tesisinden çıkacak uçucu küllerin değerlendirilebileceği örnek – seramik karolar [20].

4. Tartışma ve sonuçlar

Bu çalışmada Bursa ilinde kurulabilecek bir atık yakma tesisinin tekno-ekonomik analizi yapılmıştır. Çalışma kapsamında Bursa ilindeki İnegöl, İznik ve Yenişehir ilçeleri dışındaki tüm ilçelerden toplanacak evsel katı atıkların yakılarak elektrik üretiminin sağlanması durumunda toplanacak atık miktarı, kullanılacak teçhizat, yatırım bedeli,

yatırımın karlılığı ve amortisman süresi araştırılmıştır. Bunun için Büyükşehir Belediyesinin karakterizasyon çalışmaları, literatürdeki atık yakma tesisleri için metodik ve ekonomik kabuller kullanılmıştır. Sonuçlara göre Bursa ilinde yapılacak bir evsel atıktan elektrik üretim tesisinde işlenecek atığın kalorifik değerinin 14 MJ/kg civarında olacağı saptanmıştır. Bu değer literatürdeki işletmede bulunan atık yakma tesisleri için belirtilen değerlerle paralellik göstermektedir. Söz konusu tesisin yıllık net kazancı 25 milyon dolar ve geri ödeme süresi 7,4 yıl olarak hesaplanmıştır. Son olarak, bu çalışmada yapılacak potansiyel bir yatırımın gerektirdiği çevresel koruma önlemleri de tartışılmıştır. Ortaya çıkacak atık gazların arıtılmasının mümkün olduğu, kül ve cüruf gibi katı atıkların da geri dönüşümünün sağlanabileceği belirtilmiştir. Buna göre Bursa ilinde atık yakma tesisi yatırımının karlı ve çevre için de faydalı olabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Kaynaklar

- [1] Bilgili, M. Y. Katı Atık Yönetiminde Kullanılan Bazı Kavramlar ve Açıklamaları. **Avrasya Terim Dergisi**, 8 (2) , 88-97. DOI: 10.31451/ejatd.773288. (2020).
- [2] Türkiye İstatistik Kurumu. **Nüfus ve Demografi**. Erişim tarihi: 07.09.2022, <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=Nufus-ve-Demografi-109>
- [3] Yüce, M. İ., Muratoğlu, A., Yüce, Ş., Eşit, M. Gaziantep İlinin Gelecekteki İhtiyacını Karşılama üzere Göksu Havzasından Su Temini, **International Symposium of Water and Wastewater Management**. Malatya, Ekim 26-28, 2016.
- [4] Bursa Büyükşehir Belediyesi. **Bursa Entegre Katı Atık Yönetim Planı**. (2015).
- [5] Gökçe, G. & Hasanoğlu, P. Katı Atık Düzenli Depolama Sahalarının ve Vahşi Depolama Alanlarının Islahı ve Bitkilendirilmesi. **Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi**, 3 (1) , 258-271. (2015).
- [6] Çevre ve Orman Bakanlığı. **Çevresel Etki Değerlendirmesi Sektörel Rehberleri**. (2009).
- [7] Yılmaz, A. , Ünvar, S. , Koca, T. & Koçer, A. Türkiye’de Biyogaz Üretimi ve Biyogaz Üretimi İstatistik Bilgileri. **Technological Applied Sciences**, 12 (4) , 218-232. (2017).
- [8] Saltabaş, F., Soysal, Y., Yıldız, Ş., Balahorli, V. Evsel Katı Atık Termal Bertaraf Yöntemleri ve İstanbul’a Uygulanabilirliği. **Türkiye’de Katı Atık Yönetimi Sempozyumu**. İstanbul, Haziran 15-17, 2009.
- [9] Mutz, D., Hengevoss, D., Hugi, C.M. and Gross, T. Waste-to-Energy Options in Municipal Solid Waste Management. **A Guide for Decision Makers in Developing and Emerging Countries**. Eschborn. (2017)
- [10] Ecoprog. Waste to Energy 2021/2022. **Technologies, plants, projects, players and backgrounds of the global thermal waste treatment business**. (2021).
- [11] İstanbul Büyükşehir Belediyesi. Atık Yakma ve Enerji Üretim Tesisi. Erişim adresi: <https://cevre.ibb.istanbul/atik-yonetimi-mudurlugu-sube-mudurlugu/atik-yakma-ve-enerji-uretim-tesisi/>. (2022).
- [12] Öztürk, S., Bourtsalas, A. T. Potential benefits of Waste-to-Energy (WTE) for Turkey, **International Journal of Innovation Engineering and Science Research**. (2020).
- [13] Wu, J., S. Capital Cost Comparison of Waste-to-Energy (WTE), Facilities in China and the U.S. **MS Thesis, Columbia University**. (2018).
- [14] İstanbul Büyükşehir Belediyesi. İstanbul Büyükşehir Belediyesi Atık Yakma ve Enerji Üretim Tesisi ÇED Raporu. (2012).

- [15] Calixto, S. Pre-feasibility Study of a Waste-to-Energy Plant in Santiago, Chile. **MS Thesis, Columbia University.** (2015).
- [16] Tchobanoglous, G., Theisen, H. ve Eliassen, R. Katı Atıklar: Mühendislik İlkeleri ve Yönetim Konuları. **McGraw-Hill Book Co., New York.** (1977).
- [17] Tsai, Wen-Tien. An analysis of operational efficiencies in the waste-to-energy (WTE) plants of Kaohsiung municipality (Taiwan). **Resources** 8.3 (2019): 125.
- [18] EPDK. Erişim adresi: <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-72/elektrikyekdem>. (2021).
- [19] Thabit, Q., Nassour, A., Nelles, M. Flue Gas Composition and Treatment Potential of a Waste Incineration Plant. **Applied Sciences**, 12-5236. (2022).
- [20] Yuan, Q., Robert, D., Mohajerani, A., Tran, P., Pramanik, B. K. Utilisation of Waste-to-Energy Fly Ash in Ceramic Tiles, **Construction and Building Materials**, 347. (2022).