



# Kentsel atık yönetimde yaşam döngüsü değerlendirmesi: Bursa analizi Life cycle assessment for municipal waste management: Analysis for Bursa

Güray SALİHOĞLU<sup>1\*</sup>, Zehra POROY<sup>2</sup>, Nezih Kamil SALİHOĞLU<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Uludağ Üniversitesi, Bursa, Türkiye.  
gurays@uludag.edu.tr, zporoy@gmail.com, nkamils@uludag.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 22.05.2018, Kabul Tarihi/Accepted: 10.10.2018  
\* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2018.33603  
Araştırma Makalesi/Research Article

## Öz

Bursa kentinde uygulanan katı atık yönetim modeli, kentin atık yönetim ihtiyaçlarına yanıt verirken, her faaliyet gibi aynı zamanda çevre üzerinde bir yük oluşturmaktadır. Bu çalışmada Bursa'da kentsel katı atık yönetiminden kaynaklanan çevresel yükün analiz edilmesi ve bu yükü azaltmak için yapılması gerekenlerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında çevresel yük, yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) ve deponi gazı etki modellenmesi ile analiz edilmiştir. Uygulanan YDD sürecinde kentsel katı atığın yönetimi boyunca izlediği toplama, taşıma, aktarma istasyonuna iletilme, düzenli depolama alanında depolanma ve oluşan gazdan enerji eldesi süreçleri sistem sınırlarına dahil edilmiştir. YDD çalışması için SimaPro 8.5.0 yazılımı, deponi gazının değerlendirilmesi için EPA LandGem Modeli kullanılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda Bursa'da bir yılda deponi gazından enerji üretim tesisleriyle azaltılan toplam emisyonun yaklaşık 0,5 milyon ton karbondioksit eşdeğeri düzeyinde, bir yılda depolama yoluyla bertaraf edilen kentsel atığın küresel ısınmaya katkısının ise yaklaşık 44 milyon ton CO<sub>2</sub> eşdeğeri olduğu görülmüştür. Katı atık yönetiminin kirli sis (smog) oluşumuna katkısı yaklaşık 55 milyon ton O<sub>3</sub> eşdeğeri, ozon tabakasındaki incelme katkısı 647 kg CFC-11 eşdeğeri, kanserojen madde oluşumuna katkısı 22.5 CTUh ve solunum etkisi 1732 ton PM10 eşdeğeri olarak hesaplanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Karbon ayak izi, Deponi gazı, Enerji eldesi, Atık taşıma

## Abstract

Solid waste management model of the city of Bursa that responds to the waste management needs of the city creates a burden on the environment, like every other activity. The purpose of this study was to analyze the environmental burden arising from municipal solid waste management in Bursa and to determine the necessary steps to be taken to reduce this. Environmental burden was analyzed by using life cycle assessment (LCA) approach and landfill gas impact modeling. Municipal waste management steps, namely collection and transport, transport to transfer station, landfilling, energy conversion from landfill gas, were included into the system boundaries in LCA. SimaPro 8.5.0 software was used for the LCA study, and EPA LandGem model was employed for the assessment of the impact by landfill gas. The findings of the study showed that the emissions reduced by the landfill gas to energy plant in one year is approximately 0.5 million ton CO<sub>2</sub> equivalent, and the contribution of municipal waste, which is mainly managed by landfilling, to the global warming in one year is approximately 44 million ton CO<sub>2</sub> equivalent. The approximate contribution of municipal waste management to smog formation was calculated as 55 million ton O<sub>3</sub> equivalent, the contribution to depletion of ozone layer was 647 kg CFC-11 equivalent, and to carcinogenic substance formation was 22.5 CTUh. Its inhalation impact was found as 1732 ton PM10 equivalent.

**Keywords:** Carbon footprint, Landfill gas, Energy conversion, Waste transport

## 1 Giriş

Nüfusun hızlı artışı, değişen sosyal yaşam koşulları, biyo-parçalanabilir olmayan ürünlerin geliştirilmesi ve kullanılması gibi etkenler atık üretiminin artmasına neden olmakta; bu da çözülmesi gereken bir kentsel katı atık yönetimi problemini ortaya çıkarmaktadır [1]. Sağlık ve güvenlikle ilgili endişeler dışında, atık yönetim sistemlerinin çevresel yükü de endişe konusu olmaktadır. Bu nedenle, çevresel yükü daha az olan katı atık yönetim modelleri tercih edilir hale gelmektedir [2].

Çevresel sürdürülebilirlik kavramı, atık yönetim sistemleri tasarımındaki ana kriterlerden biridir [3]. Atık yönetimi, atık maddelerin çevre üzerindeki etkisini azaltmak ve madde ve enerji geri kazanımını artırmak amacıyla yapılan uygulamaların bütününe verilen isimdir. Sürdürülebilir atık yönetimi, önem sırasına göre dört aşamalı karar sürecini gerektirmektedir: Atık üretiminden olabildiğince kaçınılması; atık üretimi kaçınılmaz olduğunda atıkların geri kazanılması; geri kazanımın mümkün olmadığı durumlarda atıklardan enerji eldesi (atıkların yakılması); bütün bunların sonucunda hala atık oluşuyorsa depolama seçeneğinin değerlendirilmesi. Atık hiyerarşisinin ilk sırasında atığın kaynağında azaltılması bulunmaktadır. Bunun sağlanması durumunda, aynı zamanda işlenecek ve bertaraf edilecek atık miktarı da azaltılmış olur.

Var olan bir atığın yönetimi söz konusu olduğunda, hiyerarşi takip edilerek öncelikle atığın azaltılması ve ikinci olarak geri kazanım uygulanması uygun görülmektedir. Atık işleme ve bertaraf seçenekleri ancak uygun atık azaltma teknikleri uygulandıktan sonra düşünülmelidir.

Depolama teknolojilerinin de çevresel sürdürülebilirliğe katkısının olması beklenmektedir [3]. Katı atıkların depolama alanına götürülmeden önce, toplama taşıma süreçlerindeki çevresel etkilerinin önemli düzeyde olduğu genel olarak bilinmektedir. Bu alana yanıt vermeyi amaçlayan yeni ve daha çevre-dostu toplama taşıma sistemlerinin geliştirilmesi ve uygulanması önemlidir. Katı atıkların yönetiminde karbon ayak izini azaltan uygulamalardan biri deponi gazından enerji elde etme teknolojisidir.

Yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD), sürdürülebilirlik kavramını ölçmek ve nicel olarak açıklamak için kullanılan bir sistemdir. YDD Çevresel Toksikoloji ve Kimya Derneği (SETAC) tarafından "bir ürünün, işlemin veya faaliyetin çevresel yükünü, enerjiyi, kullanılan maddeleri ve çevreye verilen atıkların türlerini ve miktarlarını belirleyerek, çevresel gelişmeleri etkileyecek olanakları değerlendirip uygulayacak, objektif bir işlem" olarak tanımlanmaktadır [4].

YDD, ürünlerin, entegre sistemlerin ve hizmetlerin çevreye olan etkilerini, süreçlerin girdi ve çıktılarını çevresel yük olarak tanımlayan sistematik ve analitik bir yöntemdir. Söz konusu çevresel etkiler iklim değişikliği, stratosferik ozon tabakasındaki incelme, ötrofikasyonu, asidifikasyon, toksik emisyonlar gibi doğal kaynak tüketimi bazlarında değerlendirilmektedir. Bu yöntem uygulanarak sistemin tüm girdi ve çıktılarını çevresel anlamda yorumlamak ve daha çevre dostu seçenekleri sürece dahil edebilmek için gereken teknik ve bilimsel altyapıyı hazırlamak mümkün olmaktadır.

YDD uygulamaları genelde dört aşamada gerçekleştirilmektedir:

- 1) Hedef ve kapsam tanımı,
- 2) Envanter analizleri,
- 3) Etki analizleri,
- 4) Yorum [5].

Farklı ülkelerde, kentsel atıkların yakılması veya depolanmasıyla ilgili atık yönetim modeli senaryolarının çevresel etkilerinin değerlendirildiği çeşitli çalışmaların yapıldığı literatürden bilinmektedir. Örneğin Tang ve diğ. [6], bir kentsel atık yakma fırınının toplam yaşam döngüsünü YDD yöntemi kullanarak değerlendirmiştir. Çalışmada [6], atıkların yakılarak bertaraf edilmesinin küresel ısınma, asidifikasyon, ötrofikasyon, fotokimyasal ozon oluşumu üzerine etkisi araştırılmıştır. Allegrini ve diğ. [7] kentsel katı atık yakma sisteminin çevresel etkilerini YDD yöntemi ile değerlendirmiştir. Wassermann ve diğ. [8], mevcut depolama alanlarının çevresel etkilerini, yakma fırını külleri için yapılan depolama alanlarının ve gelecekte Mekanik Biyolojik Arıtma Tesislerinin (MBT) atıkları için yapılacak depolama alanlarının çevresel etkileriyle karşılaştırmıştır. Turconi ve diğ. [9] İtalya ve Danimarka'daki kentsel atık yakma fırınlarının çevresel performansını değerlendirmiştir.

Türkiye'de bu alanda sınırlı sayıda çalışma yapılmıştır. Ozeler ve diğ. [10], Ankara kenti için kentsel katı atık yönetim senaryoları geliştirmiş ve yaşam döngüsü değerlendirmesi yaparak her senaryonun getireceği çevresel yükü karşılaştırmıştır. Senaryolar kapsamında, atıkların toplanması ve taşınması, kaynaktan azaltım, maddesel geri kazanım tesisi/transfer istasyonu, yakma, anaerobik çürütme ve düzenli depolama adımları değerlendirilmiştir. Çalışmada nüfus projeksiyonu, atık kompozisyonu, atık yönetim uygulamaları ve maliyet hesaplamaları gibi veriler kullanılmıştır. Banar ve diğ. [11], Eskişehir için optimum kentsel katı atık yönetim stratejisini geliştirmek için yaşam döngüsü değerlendirmesi yöntemini uygulamıştır. Araştırmacılar atıkların toplanması, taşınması, maddesel geri kazanım tesisi, geri kazanım, kompostlama, yakma ve düzenli depolama süreçlerini senaryolar şeklinde ele alarak olası çevresel etkilerini karşılaştırmışlardır [11]. Yay [12], Sakarya kenti atık yönetimi için yapmış olduğu yaşam döngüsü değerlendirmesi çalışmasında atıkların toplama, taşıma, maddesel geri kazanım, yakma, kompostlama ve düzenli depolama adımlarını değerlendirmiştir. Çalışma kapsamında Sakarya kentindeki alansal verilerden, yazılım ve literatür kaynaklarından faydalanıldığı belirtilmiştir [12].

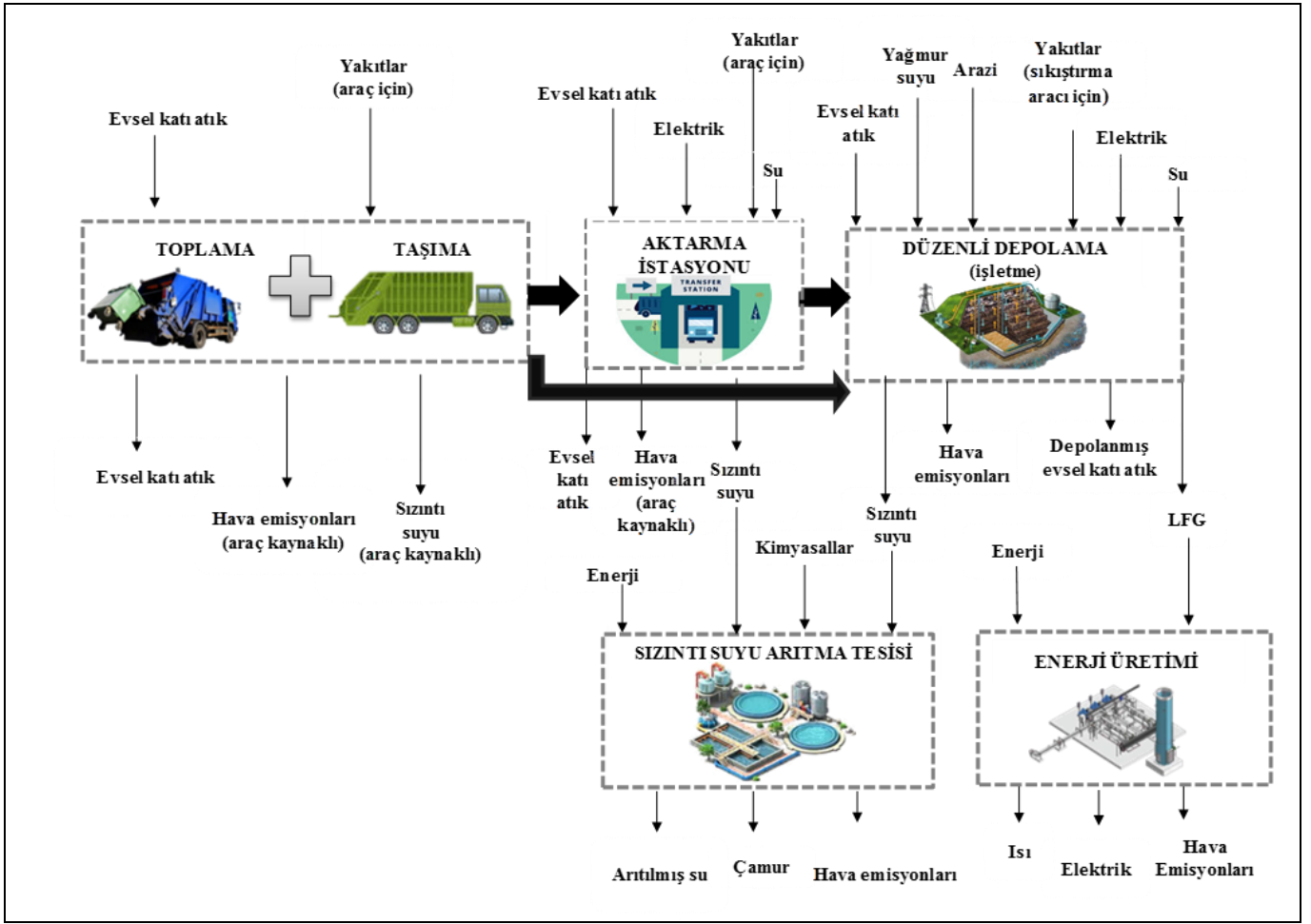
Yapılan çalışmalar incelendiğinde, senaryolar kapsamında atıkların toplanması, taşınması, maddesel geri kazanım tesisi, geri kazanım, kompostlama, yakma ve düzenli depolama süreçlerinin analizinin yapıldığı görülmektedir. Bu bütün içerisinde aktarma istasyonları, sızıntı suyu arıtma tesisi,

deponi gazından enerji eldesi gibi bileşenlerin sistem sınırlarına dahil edildiği ve mevcut durumun uygulama verileriyle detaylı analizinin yapıldığı çalışmalar çok sınırlıdır. Bu çalışmada atık yönetimi kapsamında yer alan tüm unsurları sistem sınırları içerisinde alarak ve uygulama verilerini kullanarak, Bursa'da uygulanan kentsel atık yönetim modelinin gerçek çevresel yükünü belirlemek amaçlanmıştır. Bursa'da bugüne kadar yapılan kentsel atık yönetimi uygulamalarında öncelikli hedef, atıkların çevre üzerinde oluşturduğu yükü minimize etmek olduğu için, atık yönetimi gerçekleştirilirken oluşturulan çevresel yük hesaplanmamış, dolayısıyla bu yükün en düşük düzeye indirilmesi için yapılması gerekenler belirlenmemiştir. Bu çalışma kapsamında mevcut katı atık yönetim modelinin çevresel değerlendirilmesiyle, en yüksek fayda ve en düşük çevresel etkiyi sağlamak için yapılabilecek değişiklikler ortaya konmaktadır. Bursa'da üretilen kentsel atıkların %90'ından fazlası düzenli depolama alanlarında bertaraf edilmektedir. Bazı ilçelerde küçük ölçekli düzensiz depolama alanları mevcut bulursa da bu alanlar kademeli olarak kapatılma sürecindedir. Geri kazanım çabaları bazı ilçelerde sürdürülmeye çalışılsa da genele yayılmadığı için hala sembolik düzeyde bulunmaktadır. Bursa'daki kentsel atık yönetimini %90'ın üzerinde temsil eden, düzenli depolama yoluyla bertaraf edilen kentsel atıklar, bu çalışmanın konusunu oluşturmaktadır.

## 2 Materyal ve yöntem

Çalışmada öncelikle mevcut katı atık yönetiminde yer alan tüm aşamalar için sistem sınırları ve detaylandırılma düzeyi belirlenmiştir. Sistem sınırları içerisindeki tüm aşamalar için girdi ve çıktı analizi yapılmış, gerçekleşen enerji, su, hammadde kullanımı ve bunlara bağlı çevresel emisyonlar niteliksel olarak belirlenmiştir. Fonksiyonel birim, Bursa kentinde üretilen ve yönetilen 1 ton kentsel atık olarak belirlenmiştir. Çalışmanın sistem sınırları, toplama-taşıma, aktarma istasyonu, düzenli depolama alanı, sızıntı suyu arıtma tesisi ve enerji üretimi aşamalarını kapsamaktadır (Şekil 1).

Hesaplamalar Bursa geneli için (tüm ilçelerden gelen atıkları ve Yenikent ve İnegöl'de bulunan düzenli depolama alanlarını kapsayacak şekilde) yapılmıştır. Toplama ve taşıma hesaplamalarında kullanılan yakıt/ton atık verisi için özellikle merkez ilçe belediyelerin (Yıldırım, Nilüfer ve Osmangazi) verileri kullanılmış ve ortalama değerler hesaplanmıştır. Elde edilen ortalama veri ilçelerin depolama alanlarına olan mesafesi göz önünde bulundurularak kullanılmıştır. Aktarma istasyonundaki enerji ve yakıt yükü bu istasyona atıkları taşıyan Mustafakemalpaşa ve Karacabey ilçelerinin çevresel yüküne dahil edilmiştir. Sızıntı suyu arıtma tesisi için yapılan değerlendirmeler enerji giderleri ve çamur yönetiminde kullanılan polimer sarfiyatı dikkate alınarak yapılmıştır. Enerji tüketimi hesabında SimaPro Türkiye miksi (medyum voltaj, TR market) verileri kullanılmıştır. Sistemde tüketilen hammadde ve enerji tüketim oranları fonksiyonel birim bazına indirilerek, girdi ve çıktılarla ilişkilendirilmiştir. Çalışma kapsamında ihtiyaç duyulan verilerin bir kısmı Bursa Büyükşehir Belediyesi ve ilçe belediyelerden temin edilmiş, daha sonra fonksiyonel birim özeline indirildikten sonra SimaPro 8.5.0 yazılımına girilmiştir. Ecoinvent, LCA Food DK ve Agri-footprint veri tabanları kullanılmış, ReCiPe ve TRACI metodları uygulanmıştır. Ayrıca deponi gazı modellemesi yapılarak deponi gazının oluşma potansiyeli ve çevresel etkisi belirlenmiştir.



Şekil 1: Sistem sınırları ve nitel girdi-çıkışı analizi.

Bunun için USEPA LandGEM Modeli (versiyon 3.02) kullanılmıştır. Model uygulanırken metan üretim oranı k:0.04 yıl-1, potansiyel metan üretim kapasitesi Lo: 100 m<sup>3</sup>/ton, gazdaki metan içeriği %50 ve tesis kullanım ömrü 30 yıl kabul edilmiştir.

### 3 Bulgular ve tartışma

#### 3.1 Bursa'da kentsel katı atığın yönetimi

Bursa'da üretilen kentsel atığın %89'u Yenikent düzenli depolama alanında bertaraf edilmektedir. Yenikent düzenli depolama alanına kabul edilen yıllık atık miktarı 1.1 milyon ton düzeyindedir. %11'lik kısım ise (134000 ton/yıl) İnegöl düzenli depolama alanında bertaraf edilmektedir. Düzenli depolama alanları Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik (ADD) [13] kapsamında II. Sınıf Düzenli Depolama Alanı lisansına sahiptir. Düzenli depolama yoluyla bertaraf edilen atıklar kompozisyonlarının ortalama yüzdeleri Tablo 1'de verilmektedir.

Yenikent düzenli depolama alanına gelen kentsel atığın ilçelere göre dağılımı Şekil 2'de görülmektedir.

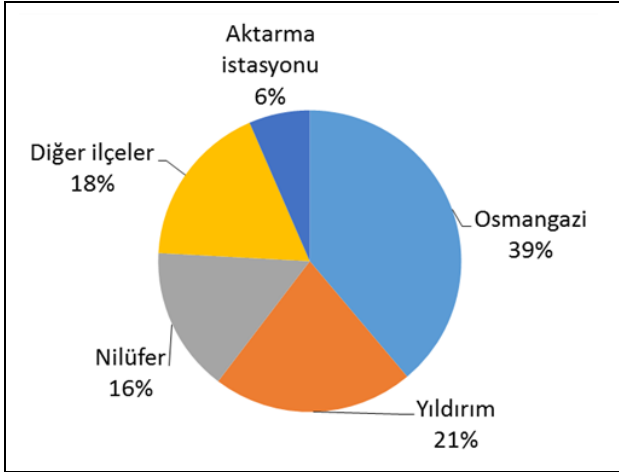
Şekil 2'de görüldüğü gibi kentsel atığın %76'sı Osmangazi, Yıldırım ve Nilüfer ilçelerinden Yenikent düzenli depolama alanına getirilmektedir. Mustafakemalpaşa ve Karacabey ilçelerinden gelen atıklar Bursa Büyükşehir Belediyesi

tarafından işletilen aktarma istasyonu aracılığıyla Yenikent düzenli depolama alanına ulaştırılmaktadır.

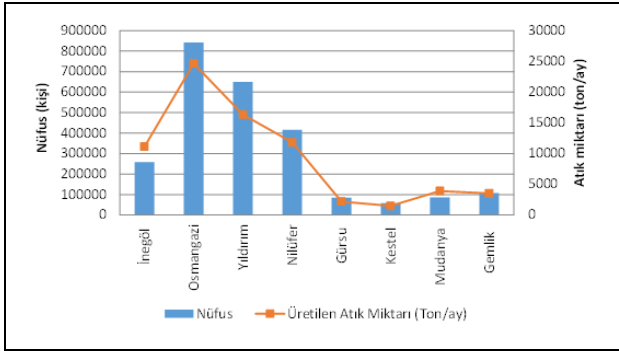
Tablo 1: Bursa ilçelerine ait atık karakterizasyonu değerleri [14].

Materyal	Ağırlık(%)	Ortalama (%)
Kağıt-Karton	3.15-11.38	6.47
Cam	0.95-5.71	2.71
Pet	0.17-2.39	0.81
Poşet	4.89-2.39	8.37
Plastik	1.055-3.56	2.18
Metal	0.21-2.33	0.83
Organik Atık	32.9-63.63	50.09
Elektrik-Elektronik	0.01-0.465	0.17
Tehlikeli Atıklar	0.02-0.64	0.30
Kompozit	0.09-0.84	0.49
Tekstil	0.99-7.78	4.45
Çocuk Bezi	0.49-6.85	3.55
Diğer Yanabilir	4.28-10.44	7.90
Diğer Yanmayan	3.24-26.29	11.68

Düzenli depolama alanlarına atık gönderen ilçelerde farklı miktarlarda atık üretilmektedir. Üretilen atık miktarındaki en önemli faktör ilçenin nüfusu olmaktadır. Şekil 3'te Yenikent ve İnegöl düzenli depolama alanlarına doğrudan atık gönderen ilçelerin nüfusu ve üretilen atık miktarları (ton/ay) görülmektedir.



Şekil 2: Yenikent düzenli depolama alanına gelen kentsel atığın ilçelere göre dağılımı.



Şekil 3: Bursa ilçelerinin nüfusu ve toplanan atık miktarları.

### 3.2 Atık taşımacılığı

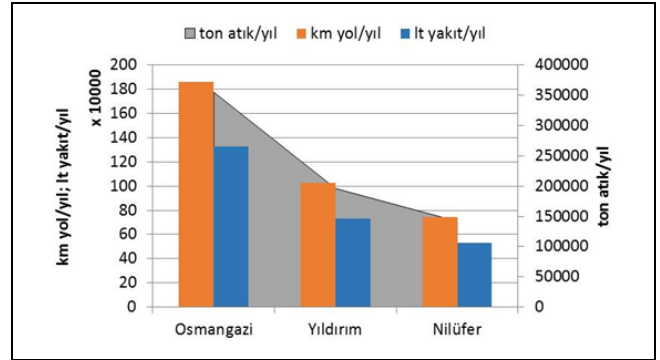
Yenikent düzenli depolama alanında depolanan atığın merkez ilçelerden (Nilüfer, Osmangazi, Yıldırım) ve aktarma istasyonundan (Mustafakemalpaşa ve Karacabey) taşınması işi 114 adet hacmi 6-10 m<sup>3</sup> olan, 108 adet hacmi 13-18 m<sup>3</sup> olan ve 1 adet de hacmi 20-22 m<sup>3</sup> olan araçlarla gerçekleştirilmektedir. Tablo 2'de Bursa'daki atıkların %82'sini taşıyan araçların tipleri ve sayıları verilmektedir.

Tablo 2: Atık taşımacılığında kullanılan araç tipleri ve sayıları.

	Hacmi 6-10 m <sup>3</sup> olan araç sayısı	Hacmi 13-18 m <sup>3</sup> olan araç sayısı	Hacmi 20-22 m <sup>3</sup> olan araç sayısı
Yıldırım	21	50	
Osmangazi	64	18	
Nilüfer	10	33	1
Mustafake malpaşa	9	6	
Karacabey	10	1	
Toplam	114	108	1

Ayrıca 55 m<sup>3</sup> hacimli 5 semitreyler yardımıyla Mustafakemalpaşa ve Karacabey ilçelerinden aktarma

istasyonuna getirilen atıklar Yenikent düzenli depolama alanına taşınmaktadır. Taşınan atık, alınan yol ve harcanan yakıt miktarları Şekil 4'te görülmektedir.



Şekil 4: İlçe belediyeler tarafından taşınan atık, alınan yol ve harcanan yakıt miktarları.

### 3.3 Deponi gazı üretimi

Yenikent depolama alanında oluşan deponi gazından enerji elde edilmektedir. Tablo 3'te enerji üretim tesisinin kuruluş aşamasında belirtilen temel finansal göstergeler verilmektedir.

Tablo 3: Deponi gazından enerji üretim tesisinin temel finansal parametreleri [15].

Parametre	Birim	Değer
Toplam yatırım maliyeti	\$	17 432 000
Kurulu güç	MW	9.8
Yıllık elektrik üretimi	GWh/yıl	68.6
Yıllık işletim giderleri	\$	1 764 000
Belediyenin payı	%	41

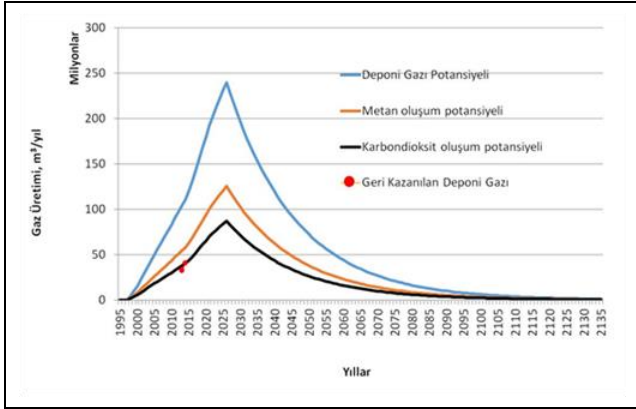
Tablo 4'te elde edilen deponi gazı bileşenlerinin ortalama düzey ve minimum-maksimum aralıkları verilmektedir.

Tablo 4: Yenikent düzenli depolama alanında oluşan deponi gazı bileşenlerinin dağılımı

	% CH <sub>4</sub>	% CO <sub>2</sub>	% O <sub>2</sub>	% İz Gazlar
Ort	52.2	36.3	0.2	11.4
Mak	60.0	42.7	1.4	27.4
Min	44.6	25.2	0.0	0.9
Std	1.6	1.0	0.0	2.6

LandGEM gaz emisyon modeliyle yapılan Yenikent düzenli depolama alanında oluşan gazın gelecekteki oluşma projeksiyonuna göre elde edilen grafik Şekil 5'te görülmektedir.

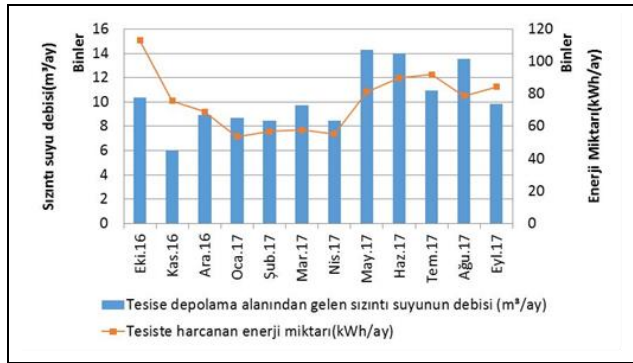
Deponi gazından enerji eldesi, küresel ısınma katkı potansiyeli yüksek olan metan gazının küresel ısınma açısından daha az zararlı hale getirilmesi anlamına gelmektedir. Bu şekilde hem doğrudan hem de dolaylı olarak önemli bir oranda seragazi emisyonundan kaçınılmaktadır. Yenikent düzenli depolama alanında bulunan deponi gazından enerji üretim tesisinin kurulu gücü dikkate alınarak yapılan modelleme çalışmasına göre, enerji üretim tesisiyle azaltılan toplam emisyon 0.497 milyon ton karbondioksit eşdeğeri/yıl düzeyindedir. Yapılan modelleme çalışmasına göre gaz toplama verimi yaklaşık %58 düzeyindedir. Buna göre gazdan enerji elde ediliyor olsa da gerek toplanamayıp atmosfere salınan metan gazı gerekse depolama esnasında kullanılan doğal kaynaklar nedeniyle depolama alanlarının çevresel yükünün önemli olabileceği unutulmamalıdır.



Şekil 5: EPA LandGEM modeli ile gaz üretim oranları projeksiyonu.

### 3.4 Sızıntı suyu arıtımı

Bursa Yenikent düzenli depolama alanında oluşan sızıntı suları 2004 yılında inşa edilen 500 m<sup>3</sup>/gün kapasiteli, aerobik ve fakültatif lagün ve ardışık kesikli aktif çamur sistemlerini içeren paralel 2 hattan oluşan 3 kademeli bir ön-arıtma tesisi ile arıtılmaktadır. Sızıntı suyu kirlilik yükleri BOİ5, KOİ ve AKM parametreleri için sırasıyla 15000 mg/L, 30000 mg/L ve 1500 mg/L düzeyindedir. Arıtılan suyun aylık KOİ ortalaması 3000 mg/L düzeyindedir. Fakültatif lagün tabanındaki çamura polimer ilavesi yapılarak belt prestren geçirilmekte, burada %20 katı madde içeriğine getirildikten sonra depolama sahasına gönderilmektedir. Şekil 6'da sızıntı suyu arıtımında harcanan enerjinin sızıntı suyu debisine göre değişimi görülmektedir.



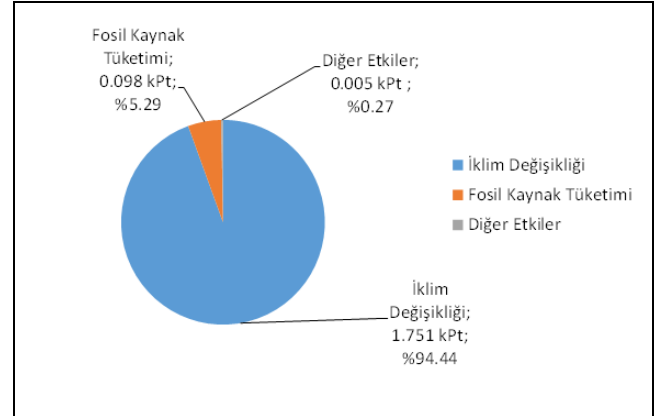
Şekil 6: Sızıntı suyu arıtımında harcanan enerjinin debiye göre değişimi.

### 3.5 Yaşam döngüsü değerlendirmesi

Yapılan değerlendirmede, Bursa'da üretilen kentsel katı atığın yönetiminden kaynaklanan çevresel etkiler hesaplandığında en büyük etkinin iklim değişikliği ve ardından fosil kaynak tüketimi yönünde olduğu görülmüştür. 1 ton kentsel atığın yönetiminden kaynaklanan çevresel etkilerinin kategorilere göre % dağılımı Şekil 7'de gösterilmektedir. Şekle göre etkinin yaklaşık %94'lük kısmı iklim değişikliği, %5'lik kısmı da fosil kaynak tüketimi üzerinde olmaktadır.

Burada yapılan hesaplamada, uluslararası alanda kabul görmüş bir analitik yöntem olan ReCiPe yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde göre bütün etkiler ağırlıklandırılmakta, points (Pt) veya kilopoints (kPt) cinsinden ifade edilmektedir. Bir kPt, batı dünyasında yaşayan 1 kişinin 1 yılda çevreye verdiği yük olarak tanımlanmaktadır.

Burada kişinin tüm üretim ve tüketim faaliyetleri dikkate alınmaktadır. 1 ton kentsel atıkla çevreye verilen etki toplamı 1.85 kPt olarak bulunmuştur. Diğer bir ifadeyle 1 ton kentsel atığın verdiği yük 1.85 kişinin yıllık çevresel yüküne eşit olmaktadır. Bunu Bursa'da bir yılda üretilen tüm kentsel atıklar için yorumladığımızda, Bursa'da 1 yılda üretilen ve depolanan kentsel atıkla bağlantılı çevresel etkinin 2288979 kişinin 1 yıllık tüm üretim ve tüketim faaliyetlerinin çevresel etkisine denk olduğu görülmüştür. Bursa'da bir yılda düzenli depolama yoluyla bertaraf edilen atığın insan sağlığı üzerindeki etkisinin yaklaşık 2 milyon insanın 1 yılda oluşturduğu etkiye eşdeğer olduğu hesaplanmıştır.



Şekil 7: Bursa'da kentsel katı atık yönetiminin çevresel etkilerinin kategorilere göre dağılımı.

Etkiler TRACI 2 V4.01 yöntemine göre değerlendirildiğinde etkileri kendi eşdeğer birimleriyle hesaplamak mümkün olmuştur. Buna göre etki kategorileri temelinde elde edilen değerler Tablo 5'te görülmektedir.

Tablo 5: Bursa'da kentsel atık yönetiminden kaynaklanan çevresel etkinin eşdeğer birimlerle ifadesi (1 ton atık için).

Etki kategorisi	Birim	Toplam/ton atık
Ozon incelmeleri	kg CFC-11 eq	0.000523053
Küresel ısınma	kg CO <sub>2</sub> eq	39530.581
Kirli sis (smog)	kg O <sub>3</sub> eq	44.524296
Asidifikasyon	mol H+ eq	-130.20032
Ötrotifikasyon	kg N eq	-1.102877
Kanserojen	CTUh	1.82E-05
Kanserojen olmayan	CTUh	-5.07E-05
Solunum etkileri	kg PM10 eq	1.3998841
Ekotoksisite	CTUe	-3817.3475

Yenikent ve İnegöl düzenli depolama alanları birlikte düşünüldüğünde, Yenikent düzenli depolama alanından elde edilen fonksiyonel birim bazındaki veriler tüm atıkların hesaplanmasında kullanıldığında, Bursa'da 1 yılda depolama yoluyla bertaraf edilen kentsel atığın küresel ısınmaya katkısı yaklaşık 48.9 milyon ton CO<sub>2</sub> eşdeğeri olarak bulunmuştur. Kirli sis (smog) oluşumuna katkısı yaklaşık 55 milyon ton O<sub>3</sub> eşdeğeri, ozon tabakasındaki incelmeye katkısı 647 kg CFC-11 eşdeğeri, kanserojen madde oluşumuna katkısı 22.5 CTUh ve solunum etkisi 1732 ton PM10 eşdeğeri düzeyindedir. Tablo 5'teki negatif değerler, depolama gazından enerji elde ediliyor olmasından kaynaklanan olumlu çevresel katkı nedeniyledir.

CTUh, insanlar için karşılaştırmalı toksisite birimi olarak kullanılmaktadır ve maruz kalınan kimyasal madde

emisyununun kilogramı başına insan nüfusunda görülen hastalık oranını (morbidite) ifade etmektedir.

Stratosferdeki ozon, insanlarda deri kanseri ve katarakt sıklığının artmasına neden olabilecek radyasyondan korunmayı sağlamaktadır. Ozonun aynı zamanda bitkiler, deniz canlıları üzerinde etkisinin olduğu bilinmektedir. Stratosferik ozon tabakasının incelmeye neden olan maddeler kloroflorokarbonlar (CFCs) birimiyle ifade edilmektedir. Bu maddeler soğutucularda, köpük kırıcı maddelerde, solventlerde, yangın söndürücü olarak kullanılan halonlarda bulunmaktadır. Bu nedenle yaşam döngüsü değerlendirme yapılırken TRACI 2 yönteminde ozon tabakasındaki incelmeye katkı CFC-11 eşdeğeri olarak ifade edilmektedir.

Partikül madde, dış ortam havasındaki küçük partiküllerin toplamını ifade etmektedir. Bu partiküllerin solunum yolları rahatsızlıkları ve ölüm gibi insan sağlığı üzerinde çeşitli olumsuz etkileri olabilmektedir. Partikül maddeler partikül olarak salındıkları gibi havadaki kimyasal reaksiyonların ürünü olarak da salınabilirler (ikincil partikül maddeler). İkincil partikül maddelerin en yaygın öncülleri kükürt dioksitler ( $SO_2$ ) ve azotoksitler ( $NO_x$ ) olarak bilinmektedirler. Birincil ve ikincil partikül maddelerin en yaygın kaynakları fosil yakıtların yakılması, ahşap yakılması, yol ve arazilerden kalkan tozlardır. Çocuklar, yaşlılar ve astımı olan insanlar partikül maddelere karşı diğer insanlara göre daha fazla hassasiyet göstermektedir. Bu nedenle yaşam döngüsü değerlendirme yapılırken TRACI 2 yönteminde solunum etkisi partikül madde 10 (PM10) eş değeri olarak ifade edilmektedir.

Zemin seviyesindeki ozon, güneşi varlığında azotoksitler ve uçucu organik bileşikler arasında gerçekleşen çeşitli kimyasal reaksiyonlardan kaynaklanmaktadır. İnsan sağlığı üzerinde bronşit, astım, anfizem gibi çeşitli solunum yolu rahatsızlıklarına neden olmaktadır.

Ozona uzun süre maruz kalındığında kalıcı akciğer hasarı ortaya çıkabilmektedir. Çeşitli ekosistemler üzerinde ekolojik tahribata ve bitkilerde hasara yol açabilmektedir. Ozon öncüllerinin başlıca kaynakları arasında motorlu araçlar, elektrik güç tesisleri ve endüstriyel faaliyetler bulunmaktadır. Bu nedenle yaşam döngüsü değerlendirme yapılırken TRACI 2 yönteminde kirli sis (smog) oluşumuna katkı  $O_3$  (ozon) eşdeğeri olarak ifade edilmektedir. Verileri Bursa'da bir yılda üretilen tüm kentsel atıklar için yorumladığımızda Tablo 6'daki değerler elde edilmektedir.

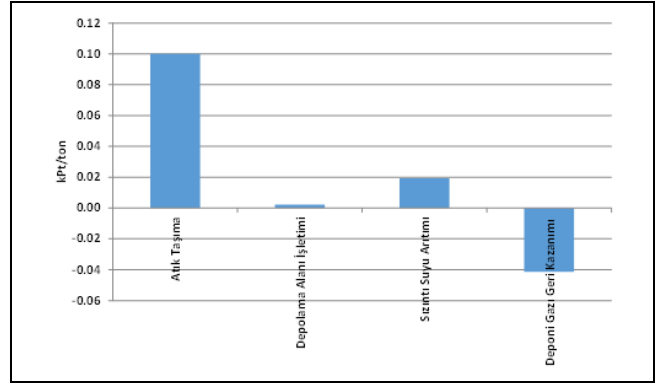
Çevresel etkinin en büyük kısmı kentsel atıkların geri kazanım yerine depolama yöntemiyle yönetiliyor oluşundan kaynaklanmaktadır. Atıkların depolanıyor olmasından kaynaklanan etkiyi dışarıda bıraktığımızda, yalnızca 1 yıl içerisinde kentsel atıkların toplama-taşıma, düzenli depolama alanı işletimi ve sızıntı suyu arıtımından kaynaklanan etkiyi hesapladığımızda bu etkinin boyutunun 148474 kişinin 1 yıllık çevresel etkisine eşdeğer olduğunu görmekteyiz. Deponi gazından enerji elde ediliyor olması bu etkiyi azaltmaktadır. Deponi gazının enerjiye dönüştürülmesinden kaynaklanan olumlu etkiye de hesaba kattığımızda toplam etkinin 98983 kişinin 1 yıllık etkisine doğru gerilediği görülmektedir.

Alt bileşenlerin oluşturduğu çevresel yük birbirleriyle kıyaslandığında atık taşımadan kaynaklanan çevresel yükün diğer alt bileşenlerden yüksek olduğu görülmüştür. Şekil 8'de sistem alt bileşenlerinin çevresel yük açısından karşılaştırılması görülmektedir.

Tablo 6: Bursa'da kentsel atık yönetimi alt sistemlerinin oluşturduğu çevresel yük.

Çevresel Yükü Oluşturan Kalemler	kPt/ton atık
Tüm Etkiler*	1.85
Toplama & taşıma + Deponi Alanı İşletimi + Sızıntı Suyu Arıtımı	0.12
Toplama & taşıma + Deponi Alanı İşletimi + Sızıntı Suyu Arıtımı + Deponi Gazından Enerji eldesi	0.08

\*: Atıkların depolanıyor oluşundan kaynaklanan çevresel etki dâhil edildiğinde.



Şekil 8: Bursa kentsel atık yönetim sistemi alt bileşenlerinin çevresel yüklerinin karşılaştırılması.

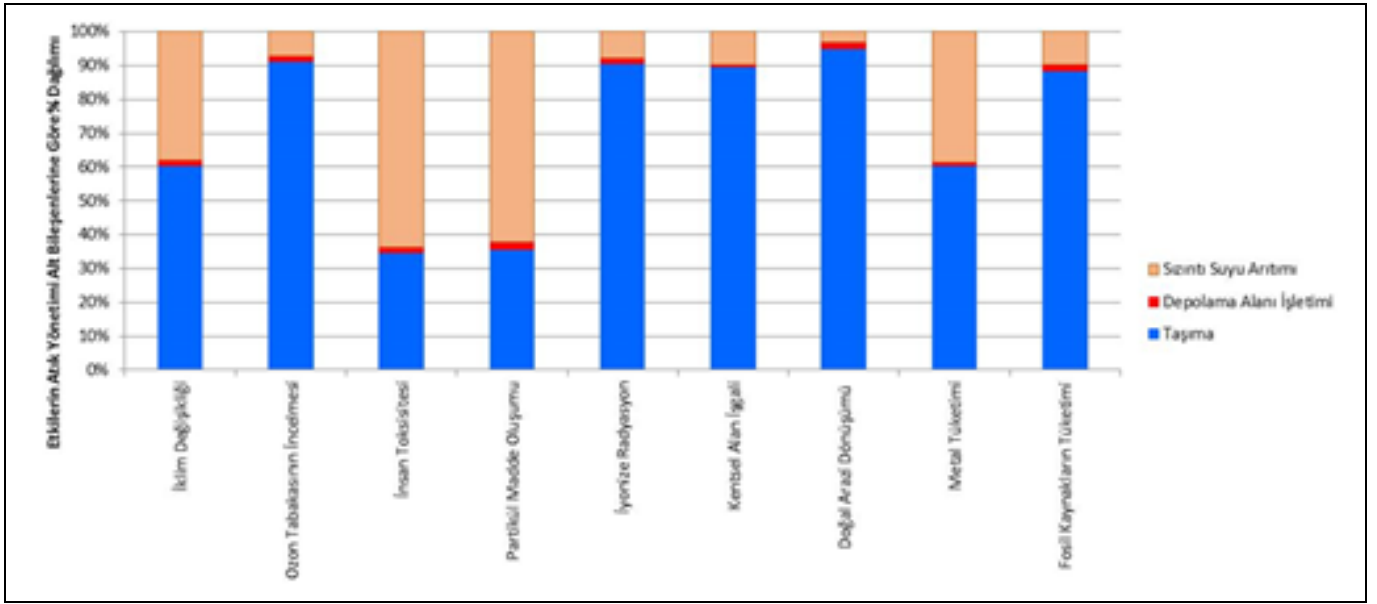
Etki kategorilerine göre dağılımında sistem alt bileşenlerinin etkisinin % dağılımı Şekil 9'da görülmektedir.

Şekil 9'da, atıkların depolanıyor olmasının etkisi değerlendirme dışı bırakıldığında, sistemin alt bileşenleri üzerinden yapılan değerlendirmede, iklim değişikliğine neden olan en büyük etkinin toplama & taşıma alt bileşeni olduğu görülmektedir. Bunu sızıntı suyu arıtımının etkisi izlemektedir. Düzenli depolama alanı işletiminden kaynaklanan etkilerin diğer alt bileşenlerin neden olduğu etkilerden daha düşük bir yüzdeyi oluşturduğu görülmektedir.

#### 4 Sonuçlar

Bursa'da üretilen kentsel katı atığın yönetim süreçlerinin yaşam döngüsü değerlendirme yöntemiyle analiz edildiği bu çalışma kapsamında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Yenikent düzenli depolama alanında depolanan 1.1 milyon ton/yıl atıktan oluşan deponi gazının toplanabilen kısmından elde edilen enerji dikkate alındığında, enerji üretim tesisiyle azaltılan toplam emisyon miktarının yaklaşık 0.5 milyon ton karbondioksit eşdeğeri/yıl düzeyinde olduğu görülmüştür,
- Bursa'da üretilen kentsel katı atığın yönetiminden kaynaklanan çevresel etkinin yaklaşık %94'lük kısmının iklim değişikliği, %5'lik kısmının da fosil kaynak tüketimi üzerinde olduğu görülmüştür.
- Bursa'da 1 yılda üretilen ve düzenli depolanan kentsel atıkla bağlantılı çevresel etkinin 2288979 kişinin 1 yıllık tüm üretim ve tüketim faaliyetlerinin çevresel etkisine denk olduğu görülmüştür. Bu etkinin büyük kısmı kentsel atıkların geri kazanım yerine depolama yöntemiyle yönetiliyor oluşundan kaynaklanmaktadır,



Şekil 9: Çevresel etkinin etki kategorilerine göre dağılımında sistem alt bileşenlerinin etkisinin % dağılımı.

- Atıkların depolanıyor olmasından kaynaklanan etkiyi dışarıda bıraktığımızda, yalnızca 1 yıl içerisinde kentsel atıkların toplama-taşıma, düzenli depolama alanı işletimi ve sızıntı suyu arıtımından kaynaklanan etkiyi hesapladığımızda bu etkinin boyutunun 148474 kişinin 1 yıllık çevresel etkisine eşdeğer olduğu görülmüştür. Deponi gazından enerji elde ediliyor olması bu etkiyi azaltmaktadır. Deponi gazının enerjiye dönüştürülmesinden kaynaklanan olumlu etki hesaba katıldığında toplam etkinin 98983 kişinin 1 yıllık etkisine gerilemektedir,
- Çevresel etkinin son nokta kategorilerine göre değerlendirmesi yapıldığında en yüksek etkinin insan sağlığı üzerine olduğu görülmüştür,
- Bursa'da 1 yılda depolama yoluyla bertaraf edilen kentsel atığın küresel ısınmaya katkısı yaklaşık 48.9 milyon ton CO<sub>2</sub> eşdeğeridir. Kirli sis (smog) oluşumuna katkısı yaklaşık 55 milyon ton O<sub>3</sub> eşdeğeri, ozon tabakasındaki incelmeye katkısı 647 kg CFC-11 eşdeğeri, kanserojen madde oluşumuna katkısı 22.5 CTU<sub>H</sub> ve solunum etkisi 1732 ton PM10 eşdeğeri düzeyindedir,
- Alt bileşenlerin oluşturduğu çevresel yük birbirleriyle kıyaslandığında atık taşımadan kaynaklanan çevresel yükün diğer alt bileşenlerden yüksek olduğu görülmüştür. Deponi gazının elektrik enerjisi olarak geri kazanımı sistemdeki toplam yükü azaltmaktadır.

Elde edilen sonuçlara göre Bursa'daki atık yönetim sisteminin daha çevre dostu olacak şekilde geliştirilmesi için yapılabilecek öneriler aşağıdaki gibidir:

Bursa'daki atık yönetim sistemi için hesaplanan çevresel etkinin en büyük kısmı (>%99) üretilen kentsel atığın

depolama alanlarında depolanıyor oluşundan kaynaklanmaktadır. Yenikent düzenli depolama alanında depolanan yıllık atığın çevresel yükü yaklaşık 44 milyon ton CO<sub>2</sub> eşdeğeri/yıl iken bunun yalnızca yaklaşık 1.5 milyon ton CO<sub>2</sub> eşdeğeri/yıl olan kısmı toplama & taşıma, saha işletimi ve sızıntı suyu arıtımından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle çevresel etkinin azaltılması için yapılması gereken öncelikli çalışma, Bursa'da evsel atıkların kaynağa azaltım/geri kazanım oranının artırılması olmalıdır.

Kentsel katı atık yönetim sistemi içerisindeki alt bileşenler kıyaslandığında en büyük etkiyi, toplama & taşıma bileşeninin oluşturduğu görülmüştür. Büyükşehir yasasında atık toplama & taşıma görev ve sorumluluğu ilçe belediyelere, nihai bertaraf yetkisi büyükşehir belediyelerine verilmektedir. Bu yaklaşımda büyükşehir belediyesi sınırları içindeki her ilçe belediyesi farklı ihale şartnameleriyle, farklı araç ve konteyner tipleriyle atık toplama & taşıma hizmetini yerine getirmeye çalışmaktadır. Araç ve konteyner tiplerinde standardizasyon, ilçe belediyeler ve büyükşehir belediyesi arasındaki koordinasyon ve bilgi akışının sağlanması ve toplama ve taşıma süreçlerinin kontrolü öncelikle ele alınması gereken konular arasındadır.

Atık toplama & taşımada yol ve harcanan yakıt miktarı, yüksek çevresel etkinin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Toplama ve taşımadan kaynaklanan çevresel ve ekonomik yükü azaltabilecek, mevcut katı atık toplama sistemlerine alternatif oluşturacak akıllı sistemler kurmak ve işletmek mümkündür. Bunun için toplama & taşıma optimizasyon modellerinin kullanımı, uygun araç ve konteyner seçimi, atık bırakma ve toplama noktalarının optimizasyon modeline göre belirlenmesi gibi tercihler olumlu sonuçlar verecektir.

Düzenli depolama alanında elde edilen gaz üretim verileri bilimsel modellerle karşılaştırıldığında, Yenikent Depolama Alanı'ndaki gaz toplama veriminin yaklaşık %50-58 düzeyinde olduğu görülmüştür. Saha işletiminde ve gaz borulamasının yapılmasında alınacak bazı önlemlerle bu verimin artırılması mümkün olabilir. Alınabilecek önlemlerden biri günlük toprak örtü tabakasının belli bir kalınlıkta sürdürülmesi olabilir. Saha

işletimi yapan yüklenicilerle gaz toplama işini yapan yüklenicinin eşgüdüm içerisinde hareket etmesi, veri akışının yüklenici ve işveren tarafından bilimsel modellerle kıyaslanarak değerlendirilmesi önem taşımaktadır. Bu konuda da kent yöneticilerinin alabileceği en ilerici kararlardan biri mevcut sahanın ve yeni tasarlanan sahanın biyoreaktör depolama sahası olarak işletimidir. Biyoreaktör depolama sahaları, sera gazı emisyonlarının kontrolü, deponi gazından enerji temininin artırılması ve depolama hacmi talebinin asgariye indirilmesi konularında avantaj sağlayacaktır.

Sızıntı suyu arıtma tesisinde kütle dengesi oluşturma çalışmaları yapılmalıdır. Atık dekompozisyonundan kaynaklanan sızıntı suyu, depolama alanına gelen atık taşıma araçlarının oluşturduğu sızıntı suyu, arıtma tesisine giriş yapan ve arıtma tesisinden deşarj edilen sızıntı suyu miktarları arasında bir kütle dengesinin oluşturulması bu tesiste alınabilecek verim önlemlerinin belirlenmesinde yardımcı olacaktır. Sızıntı suyunun yıllar içerisinde değişen nitelik ve niceliğine bağlı olarak arıtma tesisinin verimliliği, bağlandığı arıtma tesisine getireceği kirlilik yükü de dikkate alınarak yeniden değerlendirilmelidir. Bu değerlendirme, tesisin oluşturduğu çevresel yükün azaltılmasına katkı sağlayacaktır.

Sürdürülebilir kalkınma anlayışına hizmet eden bir katı atık yönetiminde geri kazanılabilir atıkların depolanması gibi bir kavram bulunmamaktadır. Atıklar içerisindeki geri kazanılabilecek malzemelerin depolanması, bu malzemeler elde edilirken harcanan doğal kaynakların ve enerjinin de tamamen kaybedilmesi anlamına gelmektedir. Düzenli depolamaya gönderilen her birim atık kütlesi için, depolamayla kısa vadeli bir çözüm bulunurken bir başka problem ortaya çıkmakta, süreç iyi yönetilmediğinde ise daha yüksek maliyet ve karmaşıklıkta yeni bir problemle karşı karşıya kalınmaktadır. Atığın oluşturulması, toplama & taşıma, depolama alanı işgali, düzenli depolama alanı işletimi, sızıntı suyu arıtımı vb. çevresel ve ekonomik yüklerini de beraberinde getirmektedir. Ancak mekanik-biyolojik işleme tesislerinde (MBT) işlem görmüş atıklardan kalan fraksiyonun depolanması söz konusu olmalıdır. Kent yönetimlerine düşen temel görev, atık hiyerarşisi çerçevesinde, bireylerin atık oluşturmaya yönelik davranış modellerinde değişikliklere neden olabilecek atık önleme projeleri geliştirmek, atığın kaynağında azaltılmasını desteklemek ve geri dönüşüm-geri kazanım sistemlerinin altyapısını oluşturmak olmalıdır.

Kentlerde entegre atık yönetimine geçerken, kentlerin bulunduğu coğrafya, personel yapısı, mali altyapı, olası çevresel yükler, teknoloji, sosyo-ekonomik, sosyo-kültürel vb. pek çok parametrenin dikkate alınması gerekmektedir. Kentsel atık yönetiminin, sürdürülebilirlik ve sıfır atık ilkeleri çerçevesinde gerçekleştirilebilmesi için Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi gibi çalışmaların çıktuları, karar vericiler açısından önemli bir destek sağlayacaktır. Bu sayede gerek ekonomik gerekse ekolojik çözümlere ulaşmak mümkün olacaktır.

## 5 Teşekkür

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde verdikleri destekten ötürü Bursa Büyükşehir Belediyesi Çevre Koruma ve Kontrol Dairesi Başkanlığı çalışanlarına teşekkür ederiz.

## 6 Kaynaklar

- [1] Asase M, Yanful EK, Mensah M, Stanford J, Amponsah S. "Comparison of municipal solid waste management systems in Canada and Ghana: A case study of the cities of London, Ontario, and Kumasi, Ghana". *Waste Management*, 29(10), 2779-2786, 2009.
- [2] Mendes MR, Aramaki T, Hanaki K. "Comparison of the environmental impact of incineration and landfilling in Sao Paulo City as determined by LCA". *Resour Conserv Recy*, 41(1), 47-63, 2004.
- [3] Cossu R. "The sustainable landfilling concept. In: Proceedings Sardinia 2005". *10th International Waste Management and Landfill Symposium*, Cagliari, Italy, 3-7 October 2005.
- [4] Barton JR, Dalley D, Patel VS. "Life cycle assessment for waste management". *Waste Management*, 16(1-3), 35-50, 1996.
- [5] International Organisation for Standardisation (ISO). "ISO 14044: Environmental Management-Life Cycle Assessment-Requirements and Guidelines". Geneva, Switzerland, 13.020.10, 2006.
- [6] Tang YT, Ma XQ, Lai ZY, Chen Y. "Energy analysis and environmental impacts of a MSW oxy-fuel incineration power plant in China". *Energy Policy*, 60, 132-141, 2013.
- [7] Allegrini E, Vadenbo C, Boldrin A, Astrup TF. "Life cycle assessment of resource recovery from municipal solid waste incineration bottom ash". *Journal of Environmental Management*, 151, 132-143, 2015.
- [8] Wassermann G, Binner E, Mostbauer P, Salhofer S. "Environmental relevance of landfills depending on different waste management strategies. In: Proceedings of Sardinia 2005". *10th International Waste Management and Landfill Symposium*, CISA, Cagliari, Sardinia, Italy, 3-7 October 2005.
- [9] Turconi R, Butera S, Boldrin A, Grosso M, Rigamonti L, Astrup T. "Life cycle assessment of waste incineration in Denmark and Italy using two LCA models". *Waste Management & Research*, 29(10), 78-90, 2011.
- [10] Ozler D, Yetis U, Demirer GN. "Life cycle assesment of municipal solid waste management methods: Ankara case study". *Environ Int*, 32(3), 405-411, 2006.
- [11] Banar M, Cokaygil Z, Ozkan A. "Life cycle assessment of solid waste management options for Eskisehir, Turkey". *Waste Management*, 29(1), 54-62, 2009.
- [12] Yay ASE. "Application of life cycle assessment (LCA) for municipal solid waste management: a case study of Sakarya". *Journal of Cleaner Production*, 94, 284-293, 2015.
- [13] T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. "Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik". Ankara, Türkiye, 27533, 2010.
- [14] İstanbul Çevre Koruma ve Atık Maddeleri Değerlendirme Sanayi ve Ticaret A.Ş. (İSTAÇ). "Bursa Entegre Katı Atık Yönetim Planı-Bursa Büyükşehir Belediyesi". Bursa, Türkiye, 2015.
- [15] DET NORSKE VERITAS (DNV). "Gold Standard Validation Report, Bursa-Hamitler Landfill Gas Collection and Energy Utilization Project". Norveç, 10300000001862, 2012.