

Atıksu arıtma çamurlarının kapalı yataklarda güneş enerjisiyle kurutulması

Nezih Kamil SALİHOĞLU*, Vedat PINARLI

Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 16059, Bursa

Özet

Ülkemizde atıksu arıtma çamurlarıyla ilgili en yaygın bertaraf yöntemi depolamadır. Mekanik süzleştirme ekipmanlarıyla %20-30 Katı Madde (KM) içeriğine ulaştırılan atık çamurlar doğrudan veya kireç ilavesinden sonra düzensiz veya düzenli depolama sahalarına depolanmaktadır. Bu çalışmada atıksu arıtma çamurlarının güneş enerjisiyle kapalı yataklarda kurutulması incelenmiştir. Ülkemizin güneş enerjisi potansiyelinden yararlanmak ve çevre yatırımlarında yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaşması çalışmaya temel oluşturmuştur. Deneysel süreç için 2m x 5m taban genişliğinde, dolgu yataklı, şeffaf polikarbonat örtülü, beton kaplama tabanlı, tünel tip kurutma yatağı tasarlanmıştır. Kapalı ve açık sistem arasındaki farkı tespit etmek amacıyla aynı boyutlarda bir de açık kurutma yatağı teşkil edilmiştir. Uzun havalandırmalı kentsel bir atıksu arıtma tesisi belt filtre presinden alınan %20-25 KM içeriğindeki çamur 25 cm yüksekliğinde beton kaplama üzerine serilmiş ve kontrollü ortamda kurutma süreci incelenmiştir. Yöntemde patojen giderimini hızlandırmak amacıyla düşük miktarda (0.15 kg sönmemiş kireç / kg KM) kullanılmıştır. %23 KM içeriğindeki atık çamurun, Temmuz-Ağustos döneminde 26 gün sonunda, açık tesiste %79 KM, kapalı tesiste ise % 91 KM oranına kadar kuruduğu görülmüştür. Kasım-Aralık döneminde %23 KM içeren çamurun, 26 gün sonunda, açık sistemde hava şartları nedeniyle %17 KM'ye düştüğü, kapalı sistemde ise % 37 KM oranına kadar kuruduğu görülmüştür. Ölçümler sonunda çamur KM yüzdesi ve eklenik radyasyon değerleri arasında doğrusal bir ilişki olduğu ($r^2 > 0.9$) belirlenmiştir. Buna göre belt filtre presi çıkışından alınan çamurun Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği'ne göre %35 KM oranına ulaşması için 45 ± 3 kW/m² güneş radyasyonuna gereksinim duyulduğu hesaplanmıştır. Pilot tesisin verimi, çamur KM değişimi, kurutma süresi, patojen mikroorganizma giderimi dikkate alınarak değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Atıksu arıtma çamuru, güneşle kurutma, katı madde, fekal koliform.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Nezih Kamil SALİHOĞLU. nkamils@uludag.edu.tr; Tel: (224) 442 81 77.
Makale metni 28.12.2006 tarihinde dergiye ulaşmış, 05.03.2007 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.06.2007 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Drying of wastewater treatment sludge in covered beds by solar energy

Extended abstract

Sludge from biological wastewater treatment plants (WWTP) occupies a significant place in waste management, especially in recent years. Waste sludge or "biosolids" are defined as organic matter containing solid or semi-solid wastes that have been generated from wastewater treatment processes (Tchobanoglous and Burton, 1991). Sludge is a significant environmental problem because of the physical, chemical, and biological pollutants it contains.

Currently, landfilling is the most common method in sludge management in our country. WWTP sludge that have been dewatered up to 20-30% dry solids (DS) content with mechanical dewatering equipment are disposed of at dumpsites or municipal landfills directly or after lime addition. Different technologies to decrease disposal costs can be applied to the WWTP sludge that can be considered as an important source with its soil enrichment capacity despite its high pathogen content. The most important parameters to be considered from the formation stage to the final disposal stage of the sludge can be given as water content, volatile solid material amount, and heavy metal and pathogen microorganism concentrations.

Solar sludge drying was examined in this study. The basis for the study was to benefit from the solar energy potential of our country and increase the use of renewable energy sources. The system designed for further sludge dewatering and drying would also be used for temporary disposal. Pathogen microorganism concentration and the need for chemical material use were decreased when the system was used. First investment and operation costs of the system become more advantageous than the mechanical dewatering systems when there is sufficient space. Paved floor bed used in the system is a well known method in natural sludge drying systems. However, paved beds are not preferred in big plants because of space need, and odor and insect problems. The method became applicable with the development of sludge mixing equipments, emission control and additional heating units in recent years (Luboschik, 1999).

The study was initiated to determine the disposal alternatives of the sludge that would be generated

from WWTP's of Bursa Metropolitan Municipality, which were recently put into operation. A tunnel type greenhouse with 2m x 5m paved bed floor width and transparent polycarbonate cover was designed. An open drying bed with the same dimensions was also constructed to determine the differences between the covered and open systems. Sludge was obtained from a municipal WWTP with extended aeration and spread over the concrete floor with a 25cm height. The drying process of the sludge was examined in controlled conditions. Limited quicklime (0.15 kg quicklime/kg DS) was used to speed up the pathogen microorganism removal. The performance of the pilot plants were evaluated according to the DS variations, drying time, pathogen microorganism removal rate and economical components. In 26 days in June-August period, the DS content of the sludge, which was 23% initially, increased up to 79%DS and 91%DS at open and covered plants, respectively. In November-December period initial 23%DS content of the sludge was decreased down to 17%DS in the open system, and increased up to 37%DS in the covered system, because of the weather conditions. A linear correlation ($r^2 > 0.9$) was found between the DS and cumulative solar radiation. Accordingly, a solar radiation of $45 \pm 3 \text{ kW/m}^2$ was found as a need to increase the DS content of the sludge from 20% to 35%.

The faecal coliform values to determine the microorganism removal were measured according to the multiple tube method of Standard Methods. Initial coliform value of 10^7 Colony Forming Unit (CFU)/g.DS of the sludge with 20%DS content decreased down to U.S.Environmental Protection Agency(EPA) Class B sludge limit, which is $2 \cdot 10^6$ CFU/g.DS (USEPA, 2000) in 45 days in summer period. By adding quicklime of 0.15kg/kg.DS to the sludge, the EPA Class A sludge limit target of 10^3 CFU/g DS was reached in 5 days. 35% DS content target of landfilling was achieved at the end of 10 days period of time in summer.

The results of the study suggested that solar drying with limited liming would be advantageous for further dewatering and/or drying purposes before the final disposal of the sludge from small and medium WWTP.

Keywords: *Wastewater treatment plant sludge, solar drying, dry solids, faecal coliform.*

Giriş

Atık çamurlar tüm dünyada gün geçtikçe artan yeni bir çevresel sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Avrupa Konseyi (AK) yönergesinin (91/271/EEC) getirdiği sınırlamalarla AB'ye üye ülkelerde 1998'de oluşan 7.2 Milyon Ton çamur Katı Maddesinin (KM), 2005 yılında 9.4 Milyon Ton KM'ye çıkması beklenmektedir. (Avrupa Çevre Ajansı (EEA), 1998.) Ayrıca Amerika Birleşik Devletleri'nde (A.B.D.) 1998'de oluşan 6.9 milyon ton KM'nin 2005'te 8.2 milyon ton KM'ye ulaşacağı hesaplanmıştır (USEPA,1999). Ülkemizde 2004 yılı verilerine göre toplam nüfusun ancak %66'sına kanalizasyon şebekesi ile hizmet verilmekte ve yine nüfusun %35'lik kısmının atıksuları bir arıtma tesisine ulaşmaktadır. Ayrıca belediyelere ait 165 atıksu arıtma tesisi ile 303 belediyeye hizmet verilmektedir. Arıtılan atıksuyun %56'sına biyolojik, %32'sine fiziksel ve %12'sine ileri arıtma uygulanmıştır (TÜİK, 2005). Avrupa Birliği (AB) adaylık çalışmalarında öncelikli dosyalardan birini oluşturan çevre konusunda yasal zorunlulukların gelmesiyle birlikte ülkemizde atıksu arıtımında yaşanacak gelişmeler atık çamur miktarını da önemli ölçüde artıracaktır. Bu yüzden atıksu arıtma teknolojilerinin seçiminde çamur ber-terafı önemli bir ana başlık oluşturmaktadır. Toplam arıtım maliyetinin yarıya yakın kısmını oluşturan çamur arıtımında ülkemizde kullanılacak yöntemlerin araştırılması, karşılanacak maliyetlerin azalmasında ve uygulamadan doğacak sorunların en aza indirilmesinde fayda sağlayacaktır. Bu amaçla gerçekleştirilen çalışmada ülkemizin güneş enerjisi potansiyelinden yararlanmak amacıyla güneşle çamur kurutma sistemleri üzerinde durulmuştur.

Çamurun kurutulması, çamur içerisindeki suyun katı kısımdan ayrılarak buharlaştırılmasını zorunlu kılmaktadır (Vaxelaire vd., 2000). Kurutma proseslerinin tasarımı ve optimizasyonu için ön şart buharlaşmanın anlaşılmasıdır. (Schwartz ve Bröcker, 2000). Çamur içerisindeki su farklı özellikler gösterdiği için genel olarak iki ana kısımda düşünülmektedir. Bunlardan birincisi; katı taneciklere bağlı olmayan serbest su, diğeri; buharlaştırılması zor olan bağlı su kısmıdır (Vaxelaire ve Cézac, 2004).

Her çamur kurutma prosesi, çamur kompozisyonu ve çamurdaki suyun dağılımı sebebiyle farklılıklar göstermektedir. Nihai çamur bertaraf yöntemine göre farklı nem içeriklerine sahip çamur eldesi için hem doğal hem de mekanik susuzlaştırma ve kurutma yöntemleri geliştirilmiştir. Çamur içerisindeki suyun doğal buharlaşmayla uzaklaştırıldığı havayla kurutma süreçleri daha az karmaşıktır, işletimi daha kolaydır ve mekanik susuzlaştırmaya göre daha az enerji ile işletilebilmektedir (USEPA, 1987). Mekanik ısı süreçlerin ise yüksek ilk yatırım, işletme ve enerji maliyetleri gerektirdiği belirlenmiştir (Bux vd., 2002).

Doğal susuzlaştırma ve kurutma yöntemlerinde ana enerji kaynağı güneştir. Güneş enerjisi geleneksel olarak seraların ısıtılmasında (Pieters ve Deltour, 2000; Kürklü vd., 2003) veya gıda ve tahıl kurutmada kullanılmaktadır (Ekechukwu ve Norton, 1999a; Leon vd., 2002). Güneşle atıksu arıtma çamurlarının kurutulması konusunda yapılan sınırlı sayıdaki çalışmalarda kent sel atıksu çamurlarının hacimlerinin azaltılması ve ilave stabilizasyon amacıyla otomatik güneşle kurutma tesislerinden bahsedilmektedir (Luboschik, 1999; Haralambopoulos vd., 2002; Bux vd., 2002). Haralambopoulos ve diğerleri (2002) ikinci kademe atıksu arıtma çamurlarının güneş imbiğiyle (solar still) susuzlaştırılması konusunda çalışmalar yürütmüştür. Luboschik (1999) atıksu arıtma çamurlarıyla yaptığı çalışmada güneşle kurutma sistemi işletme maliyetlerinin konvansiyonel mekanik kurutma sistemlerine göre daha düşük olduğunu ifade etmiştir. Ayrıca atık ısı kaynağına sahip olunması ve bu kaynağın tabandan ısıtmada kullanılması durumunda kurutma performansının arttığını belirtmiştir.

Güneşle çamur kurutmada kullanılan kapalı hacimlerin seralara benzerlikleri açık şekilde görülmektedir. Ancak seralardan farklı olarak ana tasarım amacı kurutma olduğu için yapısal bazı değişiklikler içermektedir. Kürklü ve diğerleri (2003) tünel tip seralarla yürüttükleri çalışmalarda taban altında oluşturulan taş dolgu yatak ile iç ve dış ortam arasında 10 °C'lik bir fark oluştuğunu belirlemiştir. Güneş enerjisiyle ka-

palı kurutma yataklarında çamur kurutma konusunda son yıllarda gelişmeler görölmektedir. Güneş enerjisi; kurutma sistemlerinde doğrudan veya yardımcı enerji kaynağı olarak kullanılabilir (Ekechukwu ve Norton, 1999b). Bu verilerden hareketle çalışmada kullanılan pilot tesis tasarlanmıştır. Tasarımda;

- Güneş enerjisinden yararlanarak kurutma maliyetlerinin azaltılması,
- Kurutma sırasında dış ortam şartlarının etkilerinin en aza indirilmesi,
- Oluşturulan hacimde sinek, koku ve uçucu bileşiklerin kontrolünün sağlanması,
- Taşınabilir, depolanabilir ve farklı amaçlarla kullanılabilir ürün eldesi,
- İstenildiğinde bir kompost tesisine de dönüştürülebilir ve özel durumlarda geçici depolamanın da gerçekleştirilebileceği bir hacim oluşturulması,
- Çamur şartlandırmada kullanılan kimyasal miktarının azaltılması,
- Sistemdeki ısının korunması ve ilave enerji kaynağı kullanımını mümkün kılan bir yaklaşım hedeflenmiştir.

Ulaşılmak istenen hedeflerden birisi de atık çamurların stabilizasyonudur. Çamur stabilizasyonunda önemli parametreler koku oluşumu, uçucu organik bileşiklerin azalması, oksijen kullanım seviyesi, anaerobik faaliyetin göstergesi olarak gaz oluşumu, toplam organik karbon, susuzlaştırılabilirlik, viskozite, kalorifik değer ve mikrobiyal aktivitedir (Vesilind, 1979).

Çalışmada stabilizasyonla ilgili olarak patojen mikroorganizma giderimi de incelenmiştir. Amerikan Çevre Ajansı (EPA) tarafından belirlenen çamurdaki patojen giderimine yönelik fekal koliform konsantrasyonlarındaki değişim açıklanmaya çalışılmıştır.

Materyal ve yöntem

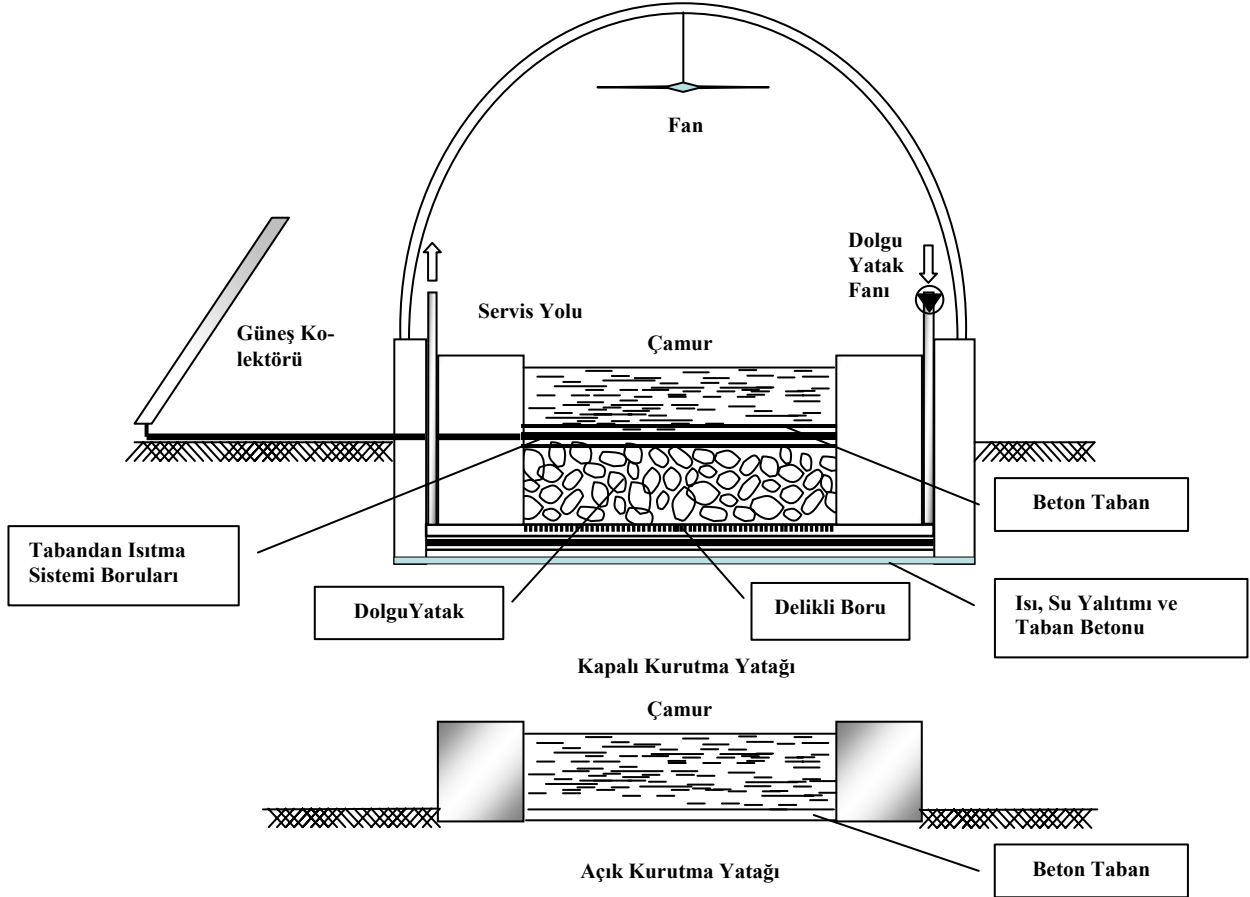
Çalışma için Bursa Su ve Kanalizasyon İdaresi (BUSKİ) Doğu Atıksu Arıtma Tesislerinde sızdırmaz, beton tabanlı, kapalı çamur kurutma yatağı pilot tesisi 2m.x 5m. ölçülerinde inşaa edilmiştir. Üzeri 8 mm. kalınlıkta, %90 ışık ge-

çirimsizliği olan tek hava bölmeli şeffaf polikarbonat örtü ile örtülmüştür. Beton zemin altına 16-48 mm. çaplı dere çakılı ile 50 cm. kalınlığında dolgu yatak teşkil edilmiştir. İç ortamda oluşan sıcak ve nemli hava tabandaki dolgu yatağa fanlar aracılığıyla gönderilerek kapalı bir döngü oluşması sağlanmıştır. Taban ısıtma sistemi iki adet düz yüzeyli güneş kolektörüne bağlanmıştır. Açık sistem için tasarlanan kurutma yatağı da aynı ölçülere sahiptir. Ancak açık sistemde taban ısıtma ve dolgu yatak teşkil edilmemiştir. Şekil 1'de pilot tesisin şeması görölmektedir.

Çalışmamızda, bir ilçenin evsel sularını da arıtan uzun havalandırmalı organize sanayi bölgesi atıksu arıtma tesisi atık çamurları ele alınmıştır. Çamur, açık ve kapalı sistemlere 25 cm. yüksekliğinde serilmiştir. Dış ve iç ortam verileri Onset Computer H21-001 HOB0 meteoroloji istasyonunu ile ölçülerek saatlik ortalamalar olarak veri derleyiciye kaydedilmiştir. Ölçülen parametreler ve ölçüm sensörlerinin hassasiyetleri şöyledir: Dış ortam rüzgar hızı ve yönü (± 0.5 m/s; < 17 m/s için, ± 3 ; 17-30 m/s için), güneş radyasyonu (10 W/m^2 veya ± 5), sıcaklık ($+25^\circ\text{C}$ ye kadar $\pm 0.7^\circ\text{C}$), nem (0° dan $+50^\circ\text{C}$ 'ye kadar $\pm 3\%$ RH), yağış yüksekliği (20 mm'ye kadar ± 1.0). Çamur sıcaklıkları, iç ortam nem ve sıcaklık değerleri de Onset Computer H21-002 HOB0 Mikro istasyon ile ölçülerek saatlik ortalamalar olarak veri derleyiciye aktarılmıştır.

Pilot tesisten alınan çamur numunelerine, BUSKİ atıksu laboratuvarlarında Standart Metotlara (APHA, AWWA, WEF, 1998) göre toplam KM, uçucu KM ve sabit KM, pH deneyleri yapılmıştır. Analizlerde WTW320 pH metre, SHIMADZU hassas terazi, TOLKİM 2004 saf su cihazı, NUVE FN 500 etüv kullanılmıştır.

Fekal koliform analizleri Standart Metotlar kitabında belirtilen En Muhtemel Sayı (MPN) yöntemine göre haftada 2 kez yapılmıştır. Brilliant green bile broth mikroorganizmaların (MO) besi yeri olarak kullanılmıştır. Dozlamının yapıldığı tüpler 24 ± 2 saat boyunca $44.5 \pm 0.2^\circ\text{C}$ 'lik etüvde bekletilmiştir. Daha sonra üremenin gerçekleştiği tüpler tespit edilerek MPN tablosundan



Şekil 1. Kapalı ve açık pilot tesislerin şematik gösterimi

gereklili hesaplamalar yapılmıştır. A sınıfı çamur kalitesine daha kısa sürede ulaşabilmek amacıyla 0,15 kg / kg KM oranında kullanılan sönmemiş kireç değeri laboratuvar denemeleri sonunda EPA'nın tariflediği gibi (USEPA, 1995; USEPA, 2001) en az 2 saat pH'nin 12 ve üzeri, 22 saat boyunca da pH 11.5'nin altına inmeyecek şekilde belirlenmiştir.

Tüm deneylerden elde edilen veriler STATISTICA 5.0 programında değerlendirilmiş $p < 0.05$ ve $p < 0.01$ olasılıklar için değişkenler ve çıktılar arasındaki ilişkilerin kayda değer olup olmadığı belirlenmiştir. Deneysel süreç boyunca çamur temininde kentsel atıksuların arıtıldığı, nutrient giderimine dayalı, uzun havalandırılmalı bir atıksu arıtma tesisinden istifade edilmiştir. Tablo 1'de izlenen parametreler ve deneylerde kullanılan yöntemler ile Tablo 2'de çamurun özellikleri yer almaktadır.

Tablo 1. İzlenen parametreler ve deneylerde kullanılan yöntemler

Parametre	Metot	Cihaz
pH	pH Elektrot	WTW
Toplam Katılar (TS)	Gravimetrik (2540 G*)	Nuve Kurutma Fırını (F400)
Uçucu Katılar (VS)	Gravimetrik (2540 G*)	LINDBERG / BLUE Yakma Fırını
Fekal Koliform	Çoklu Tüp Fermentasyonu (9221 E2*)	Nuve LD 501 Etüv
İç ve Dış Ortam Parmetreleri	Sürekli Ölçüm (Saatli Ortalama)	HOBO H21 – 22 İstasyon ve Veri Derleyici
Ağır Metaller	ICP/Mass Spectrometry (3125*)	ICP-OES Varian Vista MP-X
Toplam Organik Karbon (TOC)	Yüksek Sıcaklıkta Yakma Yöntemi (5310 B*)	Shimadzu TOC 5000A

*Standart metodlar metot numaraları

Tablo 2. Kurutma sırasında kullanılan atık çamurun özellikleri

Parametre	Ortalama ± Standart Sapma
pH	7.6 ± 0.8
Toplam Katı Madde (TKM), %	20.6 ± 1.8
Uçucu Katı Madde (UKM), %	60.4 ± 2.1
Toplam Organik Karbon mg/kg	169 ± 23
Toplam Azot, %	5.38 ± 2.13
Toplam Fosfor, %	2.7 ± 0.6
Arsenik (As), mg/kg	44.9 ± 5.7
Kadmiyum (Cd), mg/kg	1.3 ± 0.4
Krom(Cr), mg/kg	321 ± 15
Bakır (Cu), mg/kg	388 ± 18
Demir(Fe), mg/kg	10375 ± 675
Mangan (Mn), mg/kg	165 ± 8
Nikel (Ni), mg/kg	128 ± 12
Kurşun (Pb), mg/kg	29.2 ± 3.6
Çinko (Zn), mg/kg	541 ± 73

Deneysel çalışma sonuçları

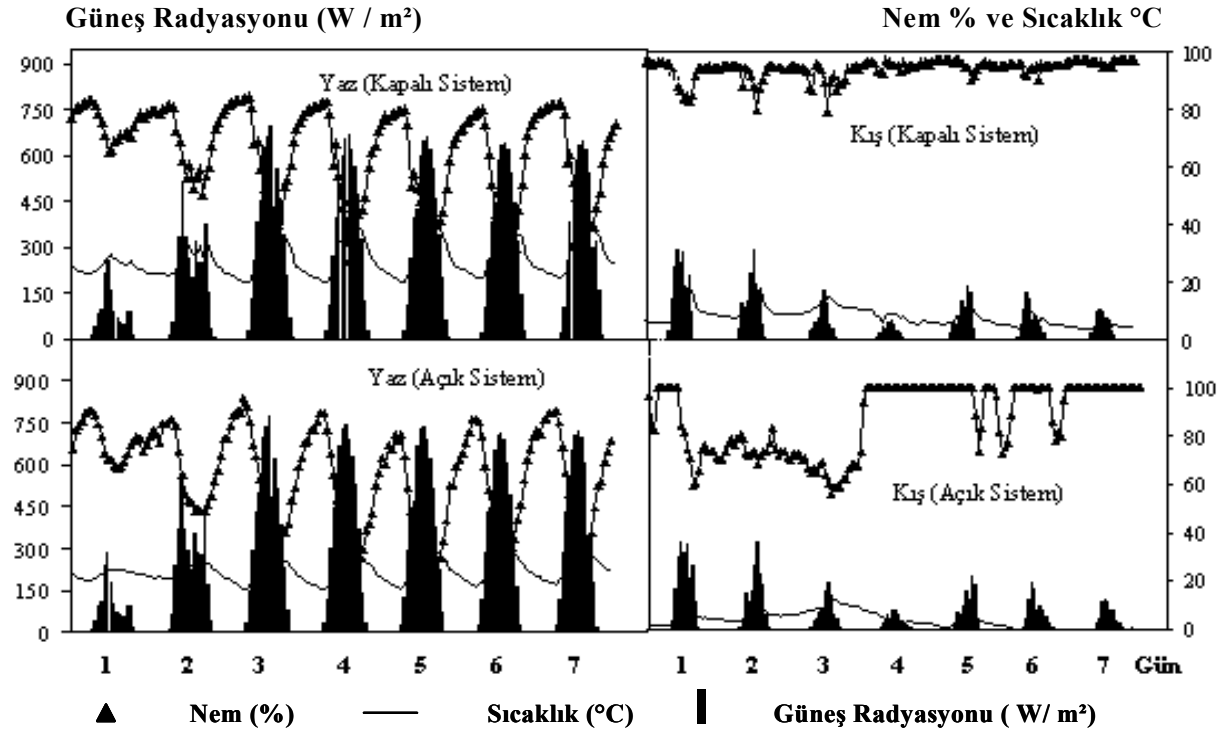
İç ve dış ortam verileri

Yapılan çalışmalar sonunda elde edilen yaz (Ağustos) ve kış (Şubat) dönemlerine ait iç ve dış ortam nem, sıcaklık ve radyasyon değişimleri Şekil 2’de verilmektedir. Yapılan istatistiksel çalışmalar sonucu %95 güven aralığı için t Testi sonuçlarına göre kapalı kurutma yatağı iç ortam

sıcaklığının kış ve yaz dönemlerinde dış ortam sıcaklıklarına göre yüksek olduğu bulunmuştur. İç ve dış ortam sıcaklıkları arasındaki ilişki yaz dönemi için $r^2=0.92$, kış dönemi için $r^2=0.84$ olarak hesaplanmıştır.

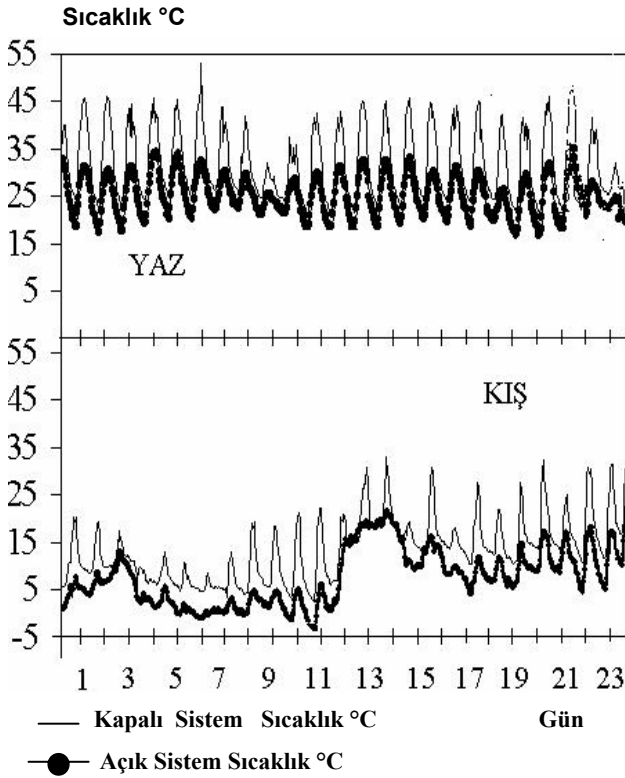
Yaz döneminde 07.00-19.00 saatleri arasında ortalama dış ortam sıcaklığı $27.70 \pm 2.07^\circ\text{C}$, ortalama iç ortam sıcaklığı $36.77 \pm 3.13^\circ\text{C}$ olarak gerçekleşmiştir. Aynı dönemde 20.00-06.00 saatleri arasında ortalama iç ortam sıcaklığı $26.27 \pm 1.58^\circ\text{C}$, ortalama dış ortam sıcaklığı $22.26 \pm 1.58^\circ\text{C}$ ’ye düşmüştür. Kış döneminde 07.00-17.00 saatleri arasında ortalama iç ortam sıcaklığı $15.29 \pm 5.48^\circ\text{C}$, ortalama dış ortam sıcaklığı $7.64 \pm 5.46^\circ\text{C}$ olarak gerçekleşmiştir. Aynı dönemde 18.00-06.00 saatleri arasında ortalama iç ortam sıcaklığı $10.16 \pm 4.22^\circ\text{C}$, ortalama dış ortam sıcaklığı $6.09 \pm 5.34^\circ\text{C}$ ’ye düşmüştür.

Kontrollü iç ortam şartları dış ortam sıcaklıklarında meydana gelen ani düşmelerden etkilenmemiştir. Kış döneminde -4.17°C ’ye düşen dış ortam sıcaklığında, iç ortam sıcaklığının güneş kolektörü çalışmıyor olmasına rağmen 2.03°C ’nin altına inmediği Şekil 3’te görülmektedir. İç ve



Şekil 2. İç ve dış ortam nem, sıcaklık ve radyasyon değişimleri

dış ortam sıcaklık değerlerinin güneş radyasyonu değerlerinden etkilendiği görülmektedir. Yaz döneminde açık ve kapalı sistemlerde artan sıcaklıkla birlikte bağıl nem değeri düşmektedir. Bu iki parametre arasındaki ilişki bu dönemde kuvvetlidir. ($r^2 = -0.92$) Kış döneminde iç ortam sıcaklığı ve bağıl nem arasındaki ilişki ($r^2 = -0.61$), dış ortamda ($r^2 = -0.68$) olmaktadır.



Şekil 3. Yaz ve kış dönemlerinde açık ve kapalı sistem sıcaklık farkları

Kapalı kurutma yatağının bağıl nem değeri t Testine göre %95 güven aralığında dış ortama göre hem yaz hem kış döneminde daha yüksek bulunmuştur. Yaz döneminde gündüz saatlerinde ortalama bağıl nem değeri iç ortamda 61.05 ± 8.91 , dış ortamda 51.95 ± 11.67 olarak gerçekleşmiştir. Dış ortamda nem değerinin rüzgarla düştüğü saptanmıştır. Buradan, sistemde oluşan su buharının mevcut fanlarla tahliye edilemediği sonucuna varılmış, otomatik kontrol sistemiyle birlikte daha güçlü salyangoz tip fanlar kullanılmaya başlanmıştır.

Dış ortamda yapılan rüzgar yönü ölçümlerinde yaz döneminde hakim rüzgar Kuzey-Kuzey-

Doğu (K-K-D), kış döneminde Doğu (D) olarak bulunmuştur. Ölçülen ortalama rüzgar hızı değerleri yaz döneminde 1.38 ± 0.92 m/s, kış döneminde 2.34 ± 2.27 m/s'dir. Yaz döneminde 20.00-06.00 saatleri arasında iç ve dış ortam ortalama nem değerleri 84.56 ± 2.63 ve 76.23 ± 5.28 olarak gerçekleşmiştir. Önemli etkenlerden biri olan ortalama güneş radyasyonu yaz döneminde 375.69 ± 25.8 W/m², kış döneminde 85.94 ± 9.2 W/m² olarak tespit edilmiştir. Güneş radyasyonundaki azalmaya bağlı olarak buharlaşma hızında da bir azalma tespit edilmiştir. Yaz döneminde iç ortam sıcaklığı ve radyasyon arasında ($r^2 = 0.84$) gibi yüksek bir ilişki bulunurken, açık ortam sıcaklık ve radyasyon değerleri arasında bu ilişki daha düşük ($r^2 = 0.67$) tespit edilmiştir. Bu değerler kapalı sistemin güneş radyasyonundan daha fazla yararlandığını göstermektedir. Bu durum kış döneminde kapalı sistem için hesaplanan $r^2 = 0.65$, ve açık sistem için hesaplanan $r^2 = 0.26$ ile de belirlenmiştir.

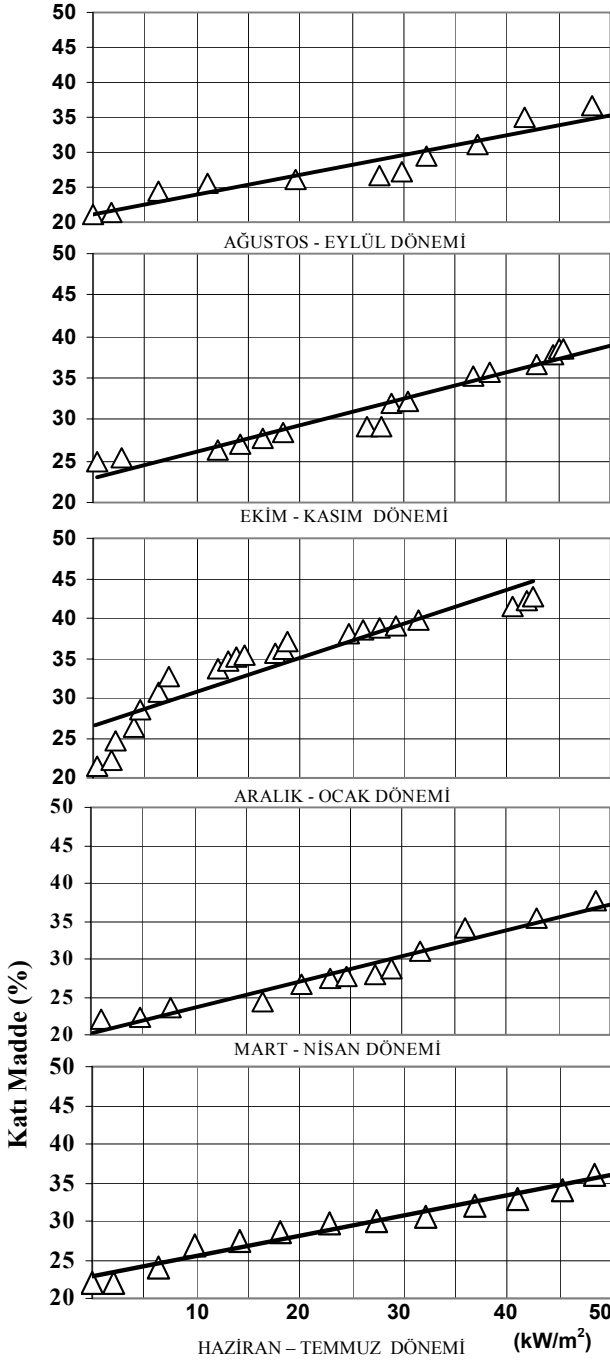
İç ortam çamur sıcaklığı yaz döneminde t Testi %95 güven aralığına göre iç ortam sıcaklığından daha yüksek bulunmuştur. Yaz döneminde açık sistemde dış ortam çamur sıcaklığı dış ortam sıcaklığından yüksek, kış döneminde ise eşit bulunmuştur. Yaz döneminde iç ortam ortalama çamur sıcaklığı 34.9 ± 2.39 °C, dış ortam ortalama çamur sıcaklığı 27.99 ± 3.17 °C ölçülmüştür. Kış döneminde ise bu değer iç ortam çamuru için 28.99 ± 6.08 °C, dış ortam çamuru için 7.85 ± 4.49 °C olarak tespit edilmiştir. Sıcaklık ölçümleriyle ilgili grafik aşağıda görülmektedir.

Deneyler sonucunda belirlenen özel bir durum ise; yaz döneminde açık ve kapalı sistem kurutma değerlerinin istatistiksel olarak eşit olmasıdır. Yaz döneminde %25KM içeriğiyle kurumaya başlayan çamur 30 gün sonunda açık sistemde %80, kapalı sistemde %95 KM'ye ulaşmıştır. Bu dönemde günlük hava sıcaklıkları zaman zaman 40°C'lerin üzerine çıkmıştır.

Katı madde ve eklenik radyasyon

Şekil 4'te farklı dönemlerde gerçekleştirilen kurutma çalışmalarında katı madde ve eklenik radyasyon arasındaki ilişki görülmektedir. Elde edilen veriler STATISTICA 5.0 ve Sigma Plot

programlarıyla yapılan çalışmalarda %95 güven düzeyinde ($p < 0.05$) için KM ile eklenik güneş radyasyonu verileri arasındaki korelasyonun kayda değer olduğu tespit edilmiştir. şekil 4'te görüleceği üzere çamurda %20 KM içeriğinden %35 KM'ye ulaşmak için gerekli güneş radyasyonu değerini yıllık ortalama olarak $45 \pm 3 \text{ kW/m}^2$ olarak bulunmuştur.



şekil 4. Katı madde ve eklenik radyasyon arasındaki ilişki

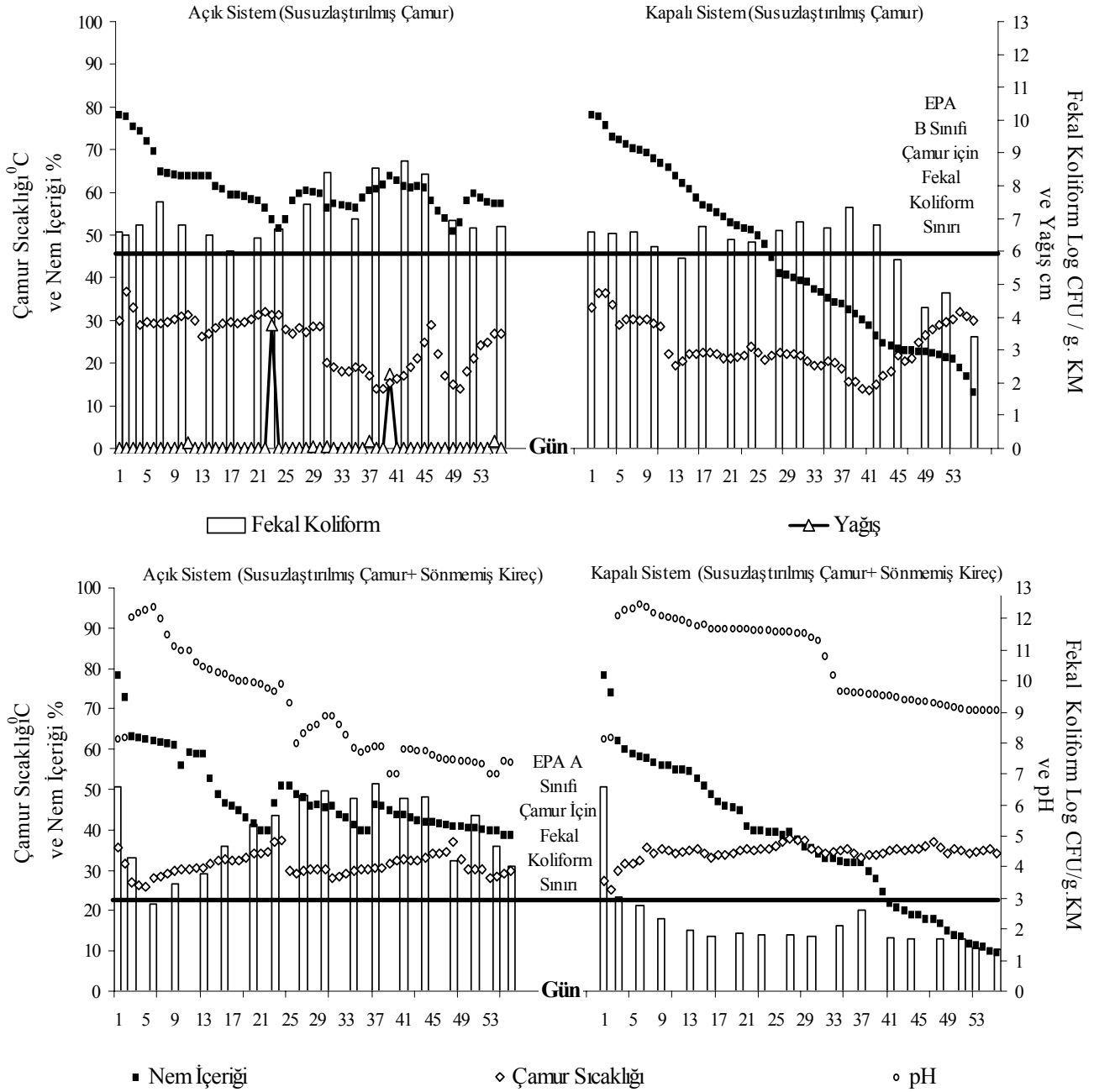
Denemelerden elde edilen verilerin istatistiksel değerlendirme sonuçları Tablo 3'te grlmektedir. Burada p: olasılık, r: korelasyon katsayısı, t: T testi sonucu N: rnek sayısıdır. şekil 3'te açık ve kapalı sistemde yaz ve kiş dönemlerinde oluşan farklılığı ortaya koyan bir veri sunulmaktadır. Yaz döneminde açık ve kapalı sistemler arası benzerlik dikkat çekmektedir. Gün içerisinde artan radyasyon değerleriyle ısınan hava nem oranında belirgin düşüşlere sebep olmakta, özellikle sabah gün doğumuna yakın saatlerde ise nem değerini en yüksek değerlerine ulaşmaktadır. Kiş döneminde özellikle açık sistemde belirli dönemlerde rzđar hızına bağlı olarak değerimler grlmektedir. İç ortamda ise nem değerini %80'nin üzerinde kararlı bir yapı gözlenmiştir. Tesisin özellikle kiş aylarında dış ortamın artan nem değerlerinden etkilendiği ve buharlaşmanın devam edebilmesi için iç ortam nem değerini düşürülme ihtiyacının olduğu belirlenmiştir. Kiş döneminde açık sistemde güneş radyasyonunda meydana gelen kısa süreli artışlar sıcak ve soğuk hava ktellerinin yer değeritirerek rzđar hızının artmasına ve nem değerlerinde önemli değerimlere neden olmaktadır.

Patojen giderimi

Patojen gideriminde indikatör MO olarak fekal koliformla ilgili çalışmalarda yaz döneminde, açık ve kapalı sistem arasındaki farklar ve kirecin bu sistemlerdeki etkisi şekil 5'te grlmektedir. Çamur konulan açık sistemde yağışlar sebebiyle kuruma istenilen lde gerçekleşmemiştir. Çamur sıcaklığı ve nem içeriğinden dolayı bu dönemde fekal koliform konsantrasyonu artış göstermiştir. Aynı şekilde açık sistemde çamura kireç ilavesini takip eden ilk hafta içinde oldukça yüksek bir fekal koliform giderimi gözlenirken yağışla çamur nem içeriğini arttırması, pH değerini düşürmesi ve çamur sıcaklığının uygun bir aralıktaki seyretmesi sebebiyle yeniden üreme gözlenmiştir. Bu konu açık alanda çamura kireç uygulamasının genel bir sonucu olarak belirlenmiştir. Çamur konan kapalı sistemde nem içeriğinin %50'nin altına inmesi sırasında bir süre fekal koliform giderimi durmuş olsa da azalan nem ile oldukça yüksek oranda fekal koliform giderimi sağlanmıştır. Yaz döneminde kapalı sistemde kireç ilave edilmesiyle

Tablo 3. Katı madde ve eklenik radyasyon değerlerinin istatistiksel değerleri

	Ortalama	Standart Sapma	r (X,Y)	r ²	t	p	N	Sabit (b)	Eğim(a)
Ağustos-Eylül	28.45	6.70	0.96	0.925	9.33	3.37E-05	9	20.76	0.00032
Ekim- Kasım	32.01	5.09	0.97	0.944	15.91	8.36E-11	17	22.99	0.00031
Aralık- Ocak	35.41	5.71	0.88	0.791	7.54	1.76E-06	17	26.94	0.00042
Mart - Nisan	37.34	10.08	0.97	0.941	15.00	5.09E-10	16	19.65	0.00035
Haziran - Temmuz	38.45	10.38	0.99	0.984	41.21	3.23E-25	28	21.90	0.00030



Şekil 5. Yaz ve kış dönemlerinde fekal koliform değişimi

fekal koliform, A sınıfı limitlerine 5 günde, %35 KM'ye ise 10 günde ulaşmıştır. Liang, ve diğerleri tarafından 2003 yılında yapılan bir çalışmada atıksu çamurlarından aerobik kompost oluşumu sırasında 22, 29, 36, 43, 50 ve 57°C'de %30, 40, 50, 60 ve 70 nem içeriğinde mikrobiyal faaliyetin izlenebilmesi için O₂ kullanım oranı (mg/g/h) bilgisayar kontrollü bir respirometre ile ölçülmüştür. Çalışma sonunda 1 mg/g/h'nin üzerindeki aktivitelerin belirlenmesi için nem içeriğinin %50 ve üzerinde olması gerekliliği belirlenmiştir. Sıcaklıkla ilgili olarak ise; 20°C altı ve 60°C üzerindeki değerlerde kompost oluşumu için gerekli mikrobiyal faaliyetin yavaşladığı görülmüştür. Tasarımda ulaşılan ortalama çamur sıcaklığı yaz döneminde dahi 34.9±2.39°C olarak ölçülmüştür. Dolayısıyla doğal yöntemlerle mikrobiyal faaliyetin yavaşlatılması zor görünmektedir. Yaptığımız çalışmada aerobik kompost oluşumuna benzer bir sürecin takip ediliyor olması nihai ürünün hem fiziksel hem de biyolojik olarak stabil bir ürün eldesinde nem ve sıcaklığın etkisini göstermesi bakımından önemlidir (Salihoğlu vd., 2006).

Güneş radyasyonu

Eşit miktar ve katı madde yüzdesine sahip, 25 cm. yükseklikte serilen ve çamur özgül ağırlığı $S_s=1.02$ tespit edilen çamurla bir yıl boyunca yapılan denemeler sonunda çamurun %20 KM'den %35 KM'ye ulaşabilmesi için ortalama 45000±3000 W/m² güneş radyasyonuna ihtiyaç olduğu ortaya konulmuştur. Tchobanoglous ve Burton (1991) tarafından ortaya konulan (1) nolu eşitlik uyarınca;

$$V = (W_s / \rho_w \cdot S_s \cdot P_s) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} V &= \text{Çamur Hacmi (m}^3/\text{gün)} \\ W_s &= \text{Çamur Katı Maddesi (kg/gün)} \\ \rho_w &= \text{Suyun Yoğunluğu (1000 kg/m}^3\text{)} \\ P_s &= \text{Katı madde Yüzdesi} \end{aligned}$$

1m²'de bulunan 0.25 m³ çamurda $P_s = \%20$ KM için $W_s = 51$ kg bulunacaktır. $P_s = \%35$ KM oranına ulaştığında $V= 0.1428$ m³ değerine düşecektir. Aradaki hacim farkı; ($V_{su} = 0.25$ m³-0.1428 m³ = 0.1072 m³) 1 m²'den buharlaşan su miktarını verir. Buradan; 0.1072 m³ x 1000 kg/m³= 107.2 kg su bulunur.

Yukarıda belirtilen şartlara sahip bir çamurun belirtilen tesiste %20 KM'den %35 KM'ye gelmesi sırasında 1 kg çamur suyunu buharlaştırabilmek için; $(45000 \pm 3000W) / 107.2 \text{ kg} = 420 \pm 28$ W güç gerektiği hesaplanabilir.

Sonuçlar

Gerçekleştirdiğimiz çalışma sonunda çamurun katı madde ve patojen mikroorganizmalar bakımından stabil, taşınabilir ve depolanabilir bir yapıya kavuşması için kapalı yataklarda güneş enerjisiyle kurutulmasının açık yataklara göre daha etkin olduğu görülmüştür. Ancak düşük miktarda kireç ilavesiyle daha verimli ve güvenli bir işletim sağlanabileceği ortaya konulmuştur. Katı Atıkların Kontrollü Yönetmeliği (KAKY) gereği atıksu çamurları depolama sınırı olan %35 Katı Madde değerine ulaşabilmek için kış döneminde 20 gün, yaz döneminde 10 günlük bir süre gerektiği belirlenmiştir. Çamura 0.15 kg sönmemiş kireç / kgKM uygulandığında aynı süreler sonunda fekal koliform bakımından da EPA A sınıfı çamur için öngörülen arıtma alternatiflerinden birinin sağlandığı görülmüştür. Bu alternatifte belirtildiği gibi çamur pH'sı 12'nin üzerinde 72 saati aşan bir süre kalmış ve fekal koliform değerinin 10³ CFU/g.KM sınırını aşmadığı görülmüştür. Fekal koliform değerlerinde 45 günlük alıkonma sürelerinde yeniden üremenin açık sistemle kıyaslandığında çok düşük oranda gerçekleştiği belirlenmiştir. Kapalı sistemde, düşük miktarda kireç ilave edilmiş çamurların güneşle kurutulmaları sırasında nem içeriğinin düşmüş ve pH uzun süre korunmuştur. Bu nedenle sistemde uzun dönemli çamur depolama mümkün görünmektedir. Katı madde ile eklenik güneş radyasyonu arasında varılan sonuçlar; %20 KM'den %35 KM'ye ulaşabilmek için 45±3 kW/m² güneş radyasyonuna ihtiyaç duyulduğunu ortaya koymuştur.

Elde edilen sonuçlar tasarladığımız kapalı kurutma yatağının açık kurutma yatağına göre kurutma ve fekal koliform giderimi açısından daha avantajlı olduğunu ortaya koymuştur. İç ortam nem, sıcaklık değerleri ile havalandırma miktar ve hızlarının otomatik olarak kontrol edilmesi durumunda kurutma sürelerinde azalma olması beklenmektedir (Salihoğlu vd., 2006). Tesisin işletimi sırasında kirecin uygulanmaması durumunda yüksek koku

ve yaz aylarında sinek problemiyle karşı karşıya kalınmıştır. Ayrıca yapılan çalışmalar, tesiste çamurun serilmesi ve kaldırılması esnasında özel bir ekipmana gereksinim duyulacağını göstermiştir. Kapalı sistemin, küçük ve orta ölçekli atıksu arıtma tesislerinde, kompost üretim tesisine dönüştürülebilecek ve belirli mevsimlerde geçici çamur depolama alanı olarak kullanılabilir bir yapıya sahip olması önemli bir özelliktir.

Bu çalışmada varılmak istenen ana hedeflerden biri; yenilenebilir enerji kaynaklarının çevre yatırımlarında kullanılma imkanlarının ortaya konulmasıdır. Son yıllarda artan arıtma tesisleri, çamur bertaraf maliyetlerini de gündeme getirmektedir. Hangi nihai bertaraf metodu seçilirse seçilsin çamur hacminin azaltılmasında yüksek enerji talebi olan mekanik susuzlaştırma ve kurutma prosesleri ön plana çıkmaktadır. Bu proseslerin işletme maliyetlerinin düşürülmesi amacıyla özellikle küçük ve orta büyüklükteki arıtma tesisleri için, yeterli alanın mevcut olması durumunda, güneş enerjisiyle çamur kurutma ülkemiz için dikkate alınması gereken yöntemlerden biridir. Ülkemizde artan biyolojik atıksu arıtma tesisleri çamur gibi önemli bir sorunu da beraberinde getirmektedir. Çamur bertarafında yöntem seçiminde nihai bertaraf metodu önem taşımaktadır. Bu süreçte çamur nihai bertarafına yönelik ulusal kararların alınması zorunlu görünmektedir.

Teşekkür

Çalışmalarda gerekli altyapının oluşturulmasını sağladığı için Bursa Su ve Kanalizasyon İdaresi'ne (BUSKİ) ve katkılarından dolayı Yüksel Proje Uluslararası A.Ş.'ye teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- APHA, AWWA, WEF, (1998). *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 20th Ed., Washington D.C.
- Avrupa Konseyi Yönergesi (91/271/EEC) (1991). Kentsel Atıksu Arıtımı Konsey Direktifi, 21 Mayıs 1991.
- Bux, M., Baumann, R., Quadt, S., Pinnekamp J., Mühlbauer W., (2002). Volume reduction and biological stabilization of sludge in small sewage plants by solar drying, *Drying Technology*, **20**, 829–37.

- Ekechukwu, O.V., Norton, B., (1999 a). Review of solar energy drying systems II: an overview of solar drying technology. *Energy Conversion and Management*, **40**, 615–55.
- Ekechukwu, O.V., Norton, B., (1999 b). Review of solar-energy drying systems III: low temperature air-heating solar collectors for crop drying applications, *Energy Conversion and Management*, **40**, 657–67.
- Haralambopoulos, D.A., Biskos, G., Halvadakis, C., Lekkas, T.D., (2002). Dewatering of wastewater sludge through a solar still. *Renewable Energy*, **26**, 247–56.
- Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği, (1991). 14.03.1991 tarih ve 20814 sayılı Resmi Gazete, Çevre Bakanlığı, Ankara.
- Kürklü, A., Bilgin, S., Özkan, B., (2003). A study on the solar energy storing rock-bed to heat a polyethylene tunnel type greenhouse, *Renewable Energy*, **28**, 683–97.
- Leon, M.A., Kumar, S., Bhattacharya, S.C., (2002). A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers, *Renewable and Sustainable Energy Review*, **6**, 367–93.
- Liang, C., Das, K.C., McClendon, R.W., (2003). The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend, *Bioresource Technology*, **86**, 131–7.
- Luboschik, U., (1999). Solar sludge drying-based on the IST process, *Renewable Energy*, **16**, 785–8.
- Salihoğlu, N.K., Pınarlı, V., Salihoğlu, G., (2006). Solar drying in sludge management in Turkey, *Renewable Energy* (Basım aşamasında).
- Schwartz, J.P., Bröcker, S., (2000). The evaporation of water into air of different humidities and the inversion temperature phenomenon, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **43**, 1791–1800.
- Tchobanoglous, G., Burton, L.F., eds. (1991). *Wastewater Engineering Treatment, Disposal, and Reuse*, Metcalf & Eddy, Inc., 1334, McGraw-Hill, Inc. Singapore.
- TUİK (2005). www.die.gov.tr/TURKISH/SONIST/CEVRE.
- U.S.E.P.A., (1987). Dewatering Municipal Wastewater Sludges, *U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development*, EPA625/1-93/014.
- U.S.E.P.A., (1995). A Guide to the Biosolids Risk Assessment for the EPA Part 503 Rule, *U.S. Environmental Protection Agency, Office of Wastewater Management*, EPA832-B-93-005.

- U.S.E.P.A., (1999). Biosolids Generation, Use, and Disposal in The United States, *U.S. Environmental Protection Agency, Office of Wastewater Management*, EPA530-R-99-009.
- U.S.E.P.A., (2000). Guide to field storage of biosolids, *US Environmental Protection Agency, Office of Wastewater Management (EPA)*, EPA/832-B-00-007.
- U.S.E.P.A., (2001). <http://yosemite.epa.gov/r10/-water.nsf/NPDES+Permits/Sewage+S825>.
- Vesilind, P.A.,(1979). *Treatment and Disposal of Wastewater Sludges*. Ann Arbor Science Publishers inc. Michigan, U.S.A.
- Vaxelaire, J., Bongiovanni, J. M., Mousques, P., Puiggali, J. R. (2000). Thermal drying of residual sludge, *Water Research*, **34**, 4318-4323.
- Vaxelaire, J., Cézac, P. (2004). Moisture distribution in activated sludges: A review, *Water Research* **39**, 2215-2230.