

Farklı Hayvan Gübreleri ve Mısır Silajından Biyogaz Üretmek İçin Optimum Şartların Belirlenmesi: Box-Behnken Tasarımı ve Mekanizması

Nurlan AKHMETOV^{1,2*}, İrfan AR³

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Bilimleri Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye

²Hoca Ahmet Yesevi Uluslararası Türk-Kazak Üniversitesi, Türkistan, Kazakistan

³Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

*Sorumlu Yazar: nurlanahmet13@gmail.com

Geliş Tarihi: 02.11.2022 Düzeltme Geliş Tarihi: 26.04.2023 Kabul Tarihi: 07.06.2023

ÖZ

Bu çalışmada inek gübresi, at gübresi, deve gübresi ve mısır silajının anaerobik fermantasyonu çalışılmış ve bağımlı değişken uçucu katı madde (UKM) giderimi için istatistiksel bir model geliştirilmiştir. Toplam katı madde (TKM) yüzdesi, substratların karışım oranı (SKO) ve çamur yüzdesi, 2³ - faktöriyel deneysel tasarımına göre bağımsız değişkenler olarak seçilmiştir. Bağımsız değişkenlerin UKM giderimi üzerine olan etkilerinin incelenmesinde Box-Behnken deneysel tasarım yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçların istatistiksel değerlendirilmesi "Minitab-21.1.1.0" programı ile sağlanmıştır. Geliştirilen model kullanılarak en yüksek UKM giderimi, TKM (%), SKO ve çamur (%) sırasıyla 3, 1.87, 17.68 değerlerinde %66,97 olarak elde edilmiştir. Varyans analizinin (ANOVA) sonucunda R² değeri %98.41 olmuştur. Deney sonuçları dikkate alındığında, cevap yüzey yönteminin farklı hayvan gübreleri ile mısır silajının birlikte fermantasyonunda başarılı bir şekilde kullanılabileceği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Biyogaz, anaerobik fermantasyon, Box-Behnken deneysel tasarım yöntemi, hayvan gübresi, mısır silajı

Determination of Optimum Conditions for Biogas Production from Different Animal Manures and Maize Silage: Box-Behnken Design and Mechanism

ABSTRACT

In this study, anaerobic fermentation of cow, horse, camel manures and maize silage and a statistical model was developed for the removal of dependent variable volatile solids (VS). Total solids (TS), mixture of substrates (MS) and sludge ratios were chosen as independent variables according to the 2³ - factorial experimental design. Box-Behnken experimental design method was used to examine the effects of independent variables on VS removal. Statistical evaluation of the results obtained were provided with the program "Minitab-21.1.1.0". Using the developed model, the highest VS removal, TS (%), MS ratio and sludge (%) were obtained as 66.97% at 3, 1.87, and 17.68 values, respectively. As a result of analysis of variance (ANOVA), the R² value was found as 98.41%. Considering the experimental results, it has been seen that the response surface method can be used successfully in the co-fermentation of different animal manures and maize silage.

Key words: Biogas, anaerobic fermentation, Box-Behnken experimental design method, animal manure, maize silage

GİRİŞ

Dünyadaki nüfusun artması, modern sanayi ve teknoloji ile enerji gereksiniminin artmasına sebep olmuştur. Söz konusu enerji ihtiyacının karşılanması için fosil kaynakların kullanımı gün geçtikçe artmaktadır (Canbaz ve Bulut, 2021). Dolayısıyla fosil kaynaklar azalmakta ve iklim değişikliği gibi doğaya verilen zararlar artmaktadır. Enerji kullanımının yarattığı çevresel etkileri azaltmak ya da en düşük düzeyde tutabilmek için, yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanmak gerekmektedir (Öztürk ve Kaya, 2012).

BM tarafından yayınlanan “Dünya Nüfus Beklentisi” başlıklı raporda belirtildiği gibi dünya nüfusunun 2050 yılında 9.7 milyar olacağı öngörülmektedir (Anonim, 2019). Nüfusun artışı daha fazla tüketime sebep olmaktadır. Evsel ve hayvansal atıkların doğal ortamda birikmesi, çevre sorunlarını yaratan kaynakların en önemlilerinin başındadır. Son yıllarda ekonomisi ve teknolojisi ileri düzeyde olan ülkelerde enerji kaynak gereksinimlerinin karşılanması için organik atıklardan yararlanma çalışmalarına başlanmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından önemli birisi olan biyokütle enerjisinin küresel enerji ihtiyacının yaklaşık olarak %25’ini karşılayabileceği tahmin edilmektedir (Rawat, 2011).

Biyogaz üretiminde hammadde olarak kullanılan biyokütle evsel ihtiyaçlarda ve endüstriyel uygulamalarda yakıt olarak değerlendirilmektedir. Tarımsal atıklar, hayvan gübreleri, belediye ve endüstriyel atıklar biyokütle kaynağı olarak kullanılmaktadır. Ülke genelinde biyokütle kaynağından elektrik üretiminde kullanılan biyoyakıtların içinde biyogazın payı yüksektir (Işık ve Yavuz, 2022).

Anaerobik biyoteknoloji, doğal ortamın kirlenmesine yol açan yüksek miktarda karbon içeren atıkların arıtımını sağlayarak biyogaz üretebilmesi nedeni ile yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer almaktadır (Karataş, 2006).

Mısır enerji bitkileri içinde yüksek tarla verimi nedeniyle biyogaz üretiminde kullanılan en yaygın hammaddelerden biridir. Anaerobik fermantasyon için mısır silajı ve hayvan gübreleri uygun kaynaklardır. Literatürdeki bilimsel çalışmalarda hayvan gübresinin tek başına anaerobik fermantasyonu yerine mısır silajının eklenmesi ile yüksek biyogaz ve metan verimi elde edilebileceği bildirilmiştir. Ülkemizde çiftlik hayvanlarının sayısı her geçen gün artmaktadır. Bu durum doğrudan hayvan gübrelerinin artmasına yol açmaktadır. Özellikle hayvancılığın yaygın olduğu bölgelere ve orada yaşayan bölge sakinlerine büyük bir tehdit oluşturmaktadır. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) 2021 yılı sonu verilerine göre ülkemizde toplam inek sayısı 17 965 482 baş, manda 192 489 baş, at 83 718 baş, deve ise 1 204 baş olduğu belirlenmiştir (TÜİK, 2021).

Bir inek günde ortalama 23 kg, at günde yaklaşık 20.4 kg ve deve ise günde 10-17 kg kuru gübre dışkılamaktadır. Bu sebeple hayvan gübrelerinin bertarafı ve değerlendirilmesi ile ilgili çalışmalar araştırmacılar tarafından sürdürülmektedir (Coşkun ve ark., 2011; Kakar, 2016; Zacharias, 2019).

Biyogaz enerjisinin üretimi ve kullanımı için uygulanabilecek alternatif teknolojiler hızla gelişmektedir. Ülkemizde tarım ve hayvancılık yaygın olduğundan, biyogaz enerjisi için bol miktarda biyokütle mevcuttur (Çağlayan, 2020). Biyokütlenin anaerobik fermantasyonu sonucunda biyogaz ortaya çıkar (Kadam ve Panwar, 2017). Biyogaz hayvansal ve bitkisel atıklardan elde edilen yanıcı bir gazdır. Biyogazın ana bileşenleri metan ve karbondioksittir ve biyogazın içerisinde az miktarda su buharı, azot, hidrojen, hidrojen sülfür, oksijen ve karbonmonoksit bulunmaktadır (Pizzuti ve ark., 2016). Hayvansal ve bitkisel atıklardan üretilen biyogaz, ısınma ve elektrik üretimi için kullanılmaktadır. Hayvan gübrelerinin gaza dönüştürülmesi sonucunda gübrelerin kötü kokusu hissedilmeyecek kadar azalmaktadır. Anaerobik fermantasyon işleminden sonra ortaya çıkan katı ve sıvı artıklar değerli organik gübre niteliğindedir (Çanka Kılıç, 2011).

Çevre kirliliği etkisi ile bilinen peynir altı suyu ile inek gübresi karışımlarından kg uçucu katı madde başına 621 L ve %55’i CH₄ olan biyogaz üretimi başarılı, ayrıca %65’e varan kütlece peynir altı suyu ile yapılan çalışmalarda pH kontrolü için kimyasal kullanılmasına gerek olmaması çalışmayı dikkat çekici hale getirmiştir (Comino ve ark., 2012).

Gıda atıklarının sırasıyla biyogaz ve hidrojen üretimi ile Çin’de 221 milyon ton H₂ üretilebileceğini gösteren bir çalışmada ayrıntılı ekonomik analizler yapılarak konunun enerji potansiyeli temellendirilmiştir (Cudjoe ve ark., 2022).

Biyogaz üretimi için yaş inek gübresi ile mısır silajının taze kuru ve saman formlarının karıştırıldığı bir çalışmada taze mısır silajının biyogaz veriminin 470 mL/g kuru madde olarak gerçekleştiği ayrıca biyogazın CH₄ içeriğinin taze mısır silajı kullanımında en yüksek verimde olduğu tespit edilmiştir (Zhang ve ark., 2016).

Yapılan diğer bir çalışmada mezofilik kesikli sistemde inek gübresi ve zeytin artığının ortak anaerobik fermantasyonu üzerine toplam katı madde (TKM) yüzdesinin etkisi incelenmiştir. Deneylerde 3 farklı TKM yüzdesi (%10, %15, %20) uygulanmıştır. En yüksek UKM giderimi (%57,5) %10 TKM uygulanan reaktörde bulunmuştur. Deney sonuçlarına göre TKM yüzdesinin artmasıyla UKM giderim hızının azaldığı görülmüştür (Rubio ve ark., 2022).

Araştırmalarımız kapsamında literatürde, üç farklı hayvan gübresi karışımı ile mısır silajından oluşan karışım kullanılarak anaerobik fermantasyonla biyogaz üretimi üzerine yapılan çalışmaya rastlanmamıştır. Özgün

olan bu çalışma ile hayvansal ve bitkisel atıklardan biyogaz üretimine ait bilimsel veriler üretilmesi planlanmıştır. Literatürdeki bilimsel çalışmalarda da görüldüğü gibi hayvansal ve bitkisel atıklardan biyogaz üretimi güncelliğini koruyan, bilim insanlarının dikkatini çeken bir konudur. Bu çalışmada farklı hayvan gübreleri ve mısır silajı içeren biyoreaktörler mezofilik (37°C) şartlar altında 32 gün boyunca çalıştırılmıştır.

Biyoreaktörlerin çalışma koşulları Box-Behnken deneysel tasarım yöntemine göre tasarlanmıştır. Deneylemlerden elde edilen sonuçların istatistiksel değerlendirilmesi “Minitab 21.1.1.0” programı ile gerçekleştirilmiştir. Varyans analizi (ANOVA) testi ise bağımsız değişkenlerin model üzerine olan etkilerini incelemede kullanılmıştır. Ayrıca toplam katı madde yüzdesi (A), substratların karışım oranı (B) ve çamur oranının (C) uçucu katı madde giderimine (Y) bağlı kodlanmış değerlerden oluşan model eşitliği elde edilmiştir.

MATERYAL ve METOT

Deneysel çalışmada kullanılan substratların özellikleri

Anaerobik fermantasyon ile biyogaz üretiminde substrat olarak süt sığırları gübresi, at gübresi, deve gübresi ve mısır silajı kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan inek gübresi ve mısır silajı Sincan İlçesindeki “Yeni Peçenek” çiftliğinden temin edilmiştir. At ve deve gübreleri ise Sincan Hayvanat Parkı’ndan temin edilmiştir. Alınan gübrenin taze olmasına dikkat edilmiştir. Deneylemde aşı olarak eklenen özümleyici (biyogaz tesisinin atık su arıtma çamuru) ise ASKİ’nin Ankara merkezi atık su arıtma tesisinde bulunan biyogaz tesisinin anaerobik çamur çürütme tanklarından alınmıştır. Bu tankların sıcaklığı anaerobik arıtım için mezofilik koşullarda en uygun sıcaklık olan 35±2°C’de sabit tutulmaktadır. Yapılan denemelerde de sıcaklık mikroorganizmaların alışık olduğu 37°C’de yapılmıştır. ASKİ’den alınan özümleyicinin denemede kullanılabileceği kadar aynı sıcaklıkta korunmasını sağlamak, mikroorganizmaların etkinliklerini sürdürmesi için önem taşımaktadır. Bu yüzden özümleyiciler tesisten termoslarla alınarak laboratuvar ortamında biyoreaktörlere koyulana kadar 37°C’deki etüvde saklanmıştır. Deneylemde kullanılan substratların özellikleri Standart Yöntemler’e göre belirlenmiştir. Elde edilen analiz sonuçları Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Deneysel çalışmada kullanılan substratların özellikleri

Substrat	TKM (Toplam katı madde), g TKM/g gübre	Nem, %	SKM (Sabit katı madde), (g SKM/g TKM)	UKM (Uçucu katı madde), (g UKM/g TKM)
İnek gübresi	0.1553	84.4726	0.0203	0.135
At gübresi	0.279	72.1009	0.0361	0.2429
Deve gübresi	0.4003	59.9722	0.0658	0.3345
Mısır silajı (nemli)	0.2647	73.5313	0.0276	0.2371
Mısır silajı (kuru)	0.9393	6.0706	0.0555	0.8838
Çamur	0.019	98.0976	0.0117	0.0073

Deneysel tasarım

Minitab en eski istatistik yazılımlarından birisidir. Kökeni seksenli yılların ortalarından başlar. Barbara F. Ryan tarafından geliştirilen bu yazılım paketi, verileri özetleyebilir, grafikler üretebilir ve regresyon analizi, varyans analizi, kontrol grafiği yapabilir. Temel faktöriyel tasarımları, kesirli faktöriyel tasarımları, cevap yüzeyi tasarımlarını ve Plackett-Burman tasarımlarını destekleyebilir. Tepki yüzeyi desteği, Box-Behnken ve tüm merkezi kompozit tasarım biçimlerini içerir (Khattree ve Rao, 2003).

Faktöriyel tasarımı cevap yüzey tasarımına dönüştürmek çok kolaydır. Yazılım ayrıca nitel faktörleri içeren etkileşim grafiklerini de destekler (bu tür analizlerin sonuçlarını okurken çok faydalıdır). Minitab, kullanımı kolay ve kullanıcının her yanıt için hedefleri belirlemesine olanak tanıyan çok uygun bir optimizasyon bölümüne sahiptir. Sonuçlar, yorumlanması kolay olan çizelge biçiminde ve işlevlerde gösterilir. Yazılım ayrıca sonuçların yer paylaşımını da destekler. Kullanıcının, giriş parametreleri için optimum değerlerin yanı sıra eksenleri tanımlamasını sağlar (Djimtoingar ve ark., 2022).

Cevap yüzeyi yöntemi (CYY), birden fazla faktörden (bağımsız değişken) etkilenen bir veya birden fazla yanıtı optimize etmek için kullanılan istatistiksel bir yöntemdir (Khuri ve Mukhopadhyay, 2010). CYY’nin temel avantajı, daha az sayıda deneysel deneme olması, bu da onu zaman ve maliyet açısından verimli hale getirmektedir (Djimtoingar ve ark., 2022).

CYY, her şeyden önce, tahminin (mümkün olduğunda) en kesin olduğu şekilde, deneyin uygulanabilir bölgenin hangi noktalarında yapılması gerektiğine karar vermek için bir kriterler topluluğudur. Araştırmanın

sorunu, deney alanı ve yanıtı tanımladıktan sonra, CYY bir yandan alternatif deneysel stratejiler ve diğer yandan bunları değerlendirmek için kriterler sağlar. En büyük avantaj, deneyi incelenen probleme uyarlama görevinin deneyleri gerçekleştirilmeden önce gerçekleştirilmesidir (Sarabia ve Ortiz, 2009).

CYY birçok endüstride ve çeşitli araştırma alanlarında, özellikle biyo-enerji alanında yardımcı olan değerli bir istatistik tabanlı optimizasyon yöntemi olduğu kanıtlanmıştır (Djimtoingar ve ark., 2022).

Bağımsız değişkenler olarak toplam katı madde yüzdesi (A), substratların karışım oranları (B) ve çamur yüzdesi (C) seçilmiştir. Uçucu katı madde giderimi (Y) ise bağımlı değişkendir.

Bağımsız değişkenlerin kodlanmış ve gerçek değerleri Çizelge 2’de verilmiştir.

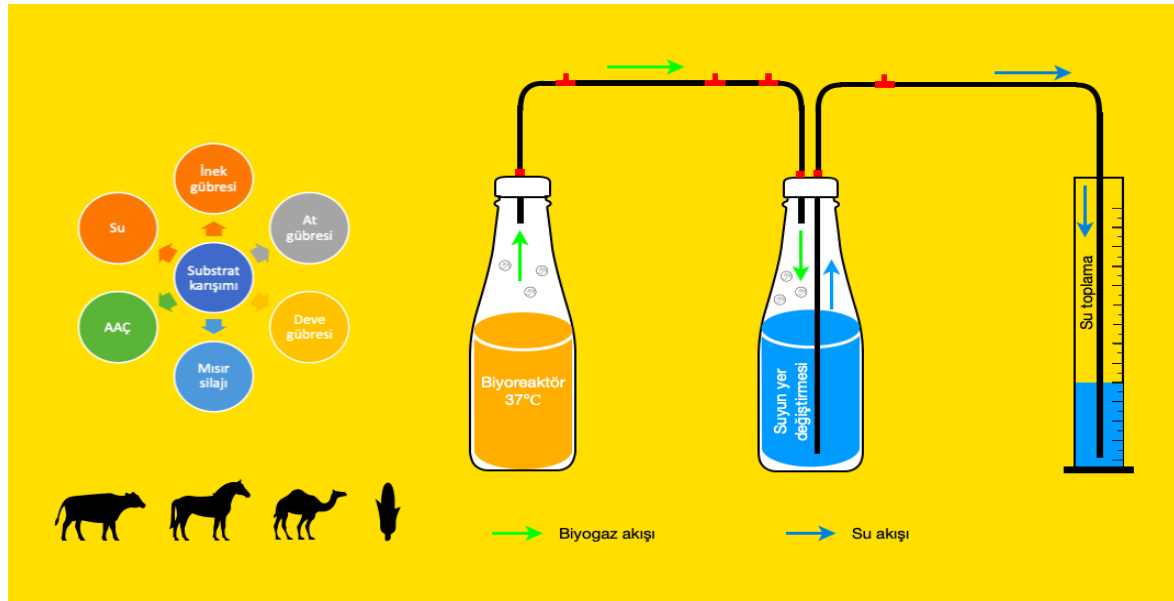
Çizelge 2. Bağımsız değişkenlerin kodlanmış ve gerçek değerleri

Giriş faktörleri	Kod	Seviye		
		-1	0	+1
TKM, (%)	A	3	5.5	8
Substratların karışım oranları	B	1 (25/45/25/5)	2 (45/25/25/5)	3 (25/25/45/5)
Çamur, (%)	C	10	20	30

Deney düzeneği

Deneyler 0.5 litre toplam hacimli ve 0.3 litre çalışma hacimli 15 adet cam biyoreaktörlerde gerçekleştirilmiştir. Biyoreaktörlere üç farklı TKM yüzdesine sahip substratların karışımı (mısır silajı, at, inek ve deve gübresi) eklenerek üzerine aşılama çamuru ve saf su ilave edilmiştir. Anaerobik sindirim için kullanılan substratların istenilen TKM içerikleri (%3, %5,5 ve %8) saf su ile seyreltilerek hazırlanmıştır. Biyoreaktörlere aşı maddesi olarak eklenen biyogaz tesisinden temin edilen atık su arıtma çamuru %10, %20 ve %30 oranlarında uygulanmıştır. Deneyler mezofilik sıcaklık koşullarında ($37\pm 2^{\circ}\text{C}$), 32 gün boyunca yürütülmüştür. Substrat karışımının pH’sı NaOH çözeltisi ilave edilerek 6,8-7,4 değerleri arasında olmasına özen gösterilmiştir. pH ve sıcaklık ayarlandıktan sonra anaerobik fermentasyon başlatılmıştır. Substrat, su ve çamur homojen bir şekilde karışması için biyoreaktörler periyodik olarak günde 3 kez yavaşça elle çalkalanmıştır. Biyoreaktörlerdeki sıcaklık deney boyunca 37°C ’de kalmasına özen gösterilmiştir. Bu nedenle söz konusu sıcaklığa ayarlanan iki adet Memmert WNB 14 markalı su banyoları kullanılmıştır.

Deney düzeneğinin genel şematik gösterimi Şekil 1’de, laboratuvar ortamında çekilen fotoğrafı ise Resim 1’de verilmiştir. Biyoreaktörlerden başlangıçta ve fermentasyon süreci tamamlandıktan sonra analiz için örnekler alınmıştır. Bu örneklerin UKM analizleri üç defa tekrarlanıp elde ettiğimiz değerlerin aritmetik ortalaması değerlendirilmiştir.



Şekil 1. 0,5 L Kapasiteli anaerobik sindirim sisteminin şeması



Resim 1. 0,5 L kapasiteli anaerobik sindirim sistemi ve su banyoları

Ölçüm yöntemleri

Tüm analizler (TKM, UKM, SKM) Standart yöntem'e göre gerçekleştirilmiştir (APHA, 1998). pH ölçümlerinde PL-700 AL pH-metre kullanılmıştır.

Deneyde kullanılan substratların toplam katı madde (TKM), sabit katı madde (SKM) ve uçucu katı madde (UKM) analizlerinde kullanılan etüv ve kül fırını Resim 2 ve 3'de gösterilmiştir.



Resim 2. Etüv (Nüve EV 018)



Resim 3. Kül fırını

BULGULAR ve TARTIŞMA

“Box-Behnken” deneysel tasarım yöntemi kesikli sistemin çalışma koşullarını tasarlamada kullanılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçların istatistiksel değerlendirilmesi “Minitab 21.1.1.0” programı ile gerçekleştirilmiştir. Varyans analizi (ANOVA) testi ise bağımsız değişkenlerin model üzerine olan etkilerini incelemeye kullanılmıştır. Deneysel tasarım ve UKM (Uçucu katı madde) giderim oranları Çizelge 3’de, ANOVA testi sonuçları ise Çizelge 4’de verilmiştir.

UKM giderimi (%) için yapılan test sonuçlarında elde edilen kodlanmış değerlerden oluşan model eşitliği aşağıda verilmiştir.

$$Y \text{ (UKM giderimi, \%)} = 60.47 - 3.596 A + 11.48 B + 0.672 C + 0.1209 A^2 - 3.453 B^2 - 0.02482 C^2 + 0.129 AB + 0.0259 AC + 0.0324 BC$$

ANOVA testinde en önemli parametre p-değeridir. Bu değer maksimum 0.05 olması şarttır. p-değeri 0.05’ten yüksek olan faktörün model üzerindeki etkisi anlamsız olarak kabul edilir. p-değeri 0.05’ten küçük

olması, o faktörün model üzerindeki etkisinin yüksek olduğunu gösterir (Ekinci ve Mutlu, 2009). Buna göre model üzerinde etkisi en fazla olan terimler toplam katı madde yüzdesi (A), substratların karışım oranlarının karesi (B²), çamur oranının karesi (C²), çamur oranı (C) ve substratların karışım oranları (B) dir. Modelden elde edilen R² değeri – 0.9841’dir. Bu değer bire yakın olması uygulanan tüm deneysel çalışma sonuçlarını iyi ifade ettiği anlamına gelmektedir.

Çizelge 3. Deneysel tasarım ve UKM (Uçucu katı madde) giderim oranları

Biyoreaktör	TKM (Toplam Katı Madde), (%)	Substratların karışım oranları, %	Çamur, %	UKM (Uçucu katı madde) giderimi, %
1	3	1 (25/45/25/5)	20	65
2	3	3 (25/25/45/5)	20	62
3	3	2 (45/25/25/5)	10	67
4	3	2 (45/25/25/5)	30	63
5	5.5	1 (25/45/25/5)	10	60
6	5.5	3 (25/25/45/5)	10	57
7	5.5	1 (25/45/25/5)	30	56
8	5.5	3 (25/25/45/5)	30	54
9	8	1 (25/45/25/5)	20	57
10	8	3 (25/25/45/5)	20	56
11	8	2 (45/25/25/5)	10	57
12	8	2 (45/25/25/5)	30	57
13	5.5	2 (45/25/25/5)	20	62
14	5.5	2 (45/25/25/5)	20	63
15	5.5	2 (45/25/25/5)	20	62

Çizelge 4. UKM giderimi (%) için yapılan varyans analizi (ANOVA)

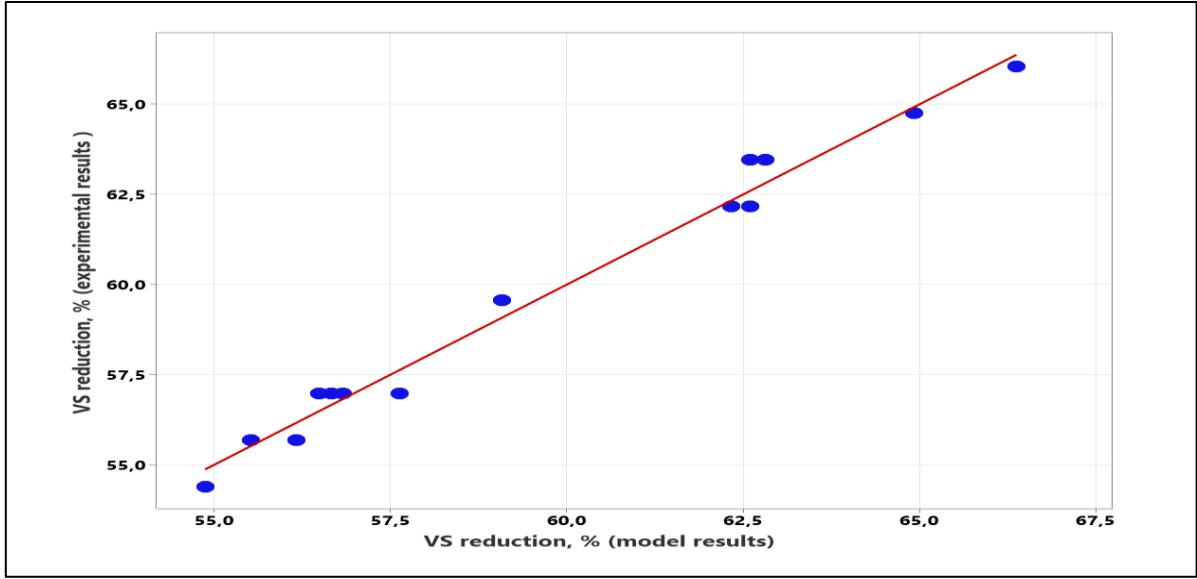
Kaynak	SD	AKT	AOK	F-değeri	P-değeri	Önemi
Model	9	198.700	22.078	34.34	0.001	*
A-TKM	1	110.893	110.893	172.50	0.000	*
B-Subst. karışım oranları	1	7.547	7.547	11.74	0.019	*
C-Çamur	1	10.272	10.272	15.98	0.010	*
AB	1	0.419	0.419	0.65	0.456	#
AC	1	1.677	1.677	2.61	0.167	#
BC	1	0.419	0.419	0.65	0.456	#
A ²	1	2.107	2.107	3.28	0.130	#
B ²	1	44.033	44.033	68.49	0.000	*
C ²	1	22.747	22.747	35.38	0.002	*
Hata	5	3.214	0.643			
Uygunsuzluk	3	2.096	0.699	1.25	0.473	#
Saf hata	2	1.118	0.559			
Toplam	14	201.914				

SD – Serbestlik derecesi; AKT - Ayarlanmış karelerin toplamı; Ayarlanmış ortalama kare; F – Fischer; p – Olasılık; R² - %98.41; * - anlamlı; # - anlamsız.

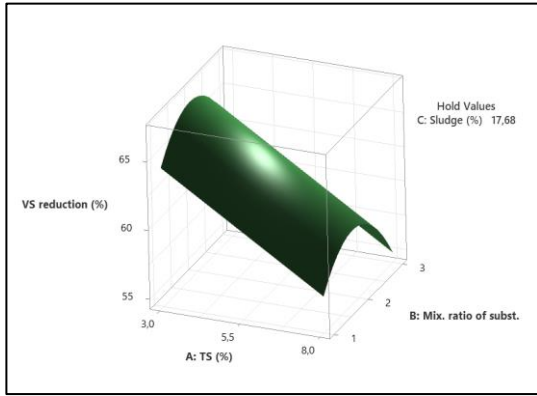
Modelden hesaplanan sonuçlar ile deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların karşılaştırılması Şekil 2’de gösterilmiştir. Grafik, sonuçların birbiriyle örtüşüğünü göstermektedir.

En yüksek UKM giderimine sahip (%) bağımsız değişkenlerin en optimal değerleri 3 (TKM, %), 1.87 (SKO), 17.68 (çamur, %) olarak bulunmuştur. Bu değerlerde UKM giderimi %66.97.

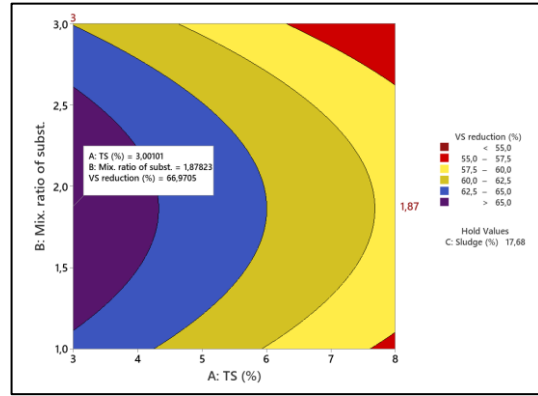
Optimum çamur oranında (%17.68) uçucu katı madde (UKM) giderimine substratın karışım oranları (SKO) ve toplam katı madde (TKM) yüzdesinin etkisini gösteren 3D grafik Şekil 3’de gösterilmiştir. Grafiğin eş yüzey eğrileri ise Şekil 4’de verilmiştir.



Şekil 2. UKM giderimi için modelden elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçların karşılaştırılması



Şekil 3. UKM giderim hızına substratların karışım oranları ve TKM yüzdesinin etkisi



Şekil 4. UKM giderim hızına substratların karışım oranları ve TKM yüzdesi etkisinin eş yüzey eğrileri gösterimi

Grafiklerde görüldüğü gibi UKM giderimi substratların karışım oranının belli bir değerine kadar artmış daha sonra UKM giderimi azalmıştır. TKM yüzdesi arttığında ise UKM giderimi düşmeye başlamıştır. En yüksek UKM giderimine (%66,97) 1,87 substratların karışım oranında ve %3 TKM yüzdesinde ulaşılmıştır.

Substratların optimum karışım oranında (1,87) uçucu katı madde (UKM) giderim hızına TKM yüzdesi ve çamur oranının etkisini gösteren 3D grafik Şekil 5'de gösterilmiştir. Grafiğin eş yüzey eğrileri ise Şekil 6'da verilmiştir.

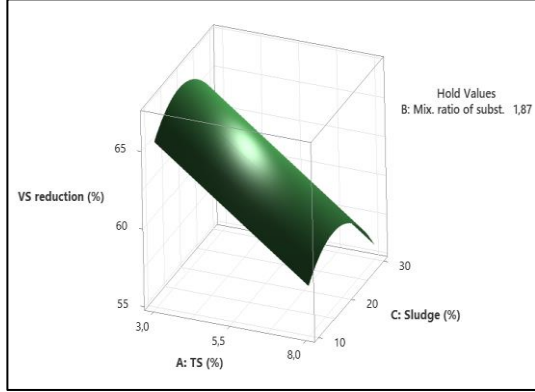
UKM giderimi üzerine toplam katı madde yüzdesi ve aşılama oranının etkisini gösteren grafikler incelendiğinde, UKM giderimi %17,68 çamur oranına kadar artmış daha sonra UKM giderimi azalmıştır. TKM yüzdesi arttığında ise UKM giderimi düşmeye başlamıştır. En yüksek UKM giderimine (%66,97) %17,68 çamur oranında ve %3 TKM yüzdesinde ulaşılmıştır.

Toplam katı madde yüzdesinin optimum değerinde (%3) uçucu katı madde (UKM) giderimine substratların karışım oranları ve çamur oranının etkisini gösteren 3D grafik Şekil 7'de gösterilmiştir. Grafiğin eş yüzey eğrileri ise Şekil 8'de verilmiştir.

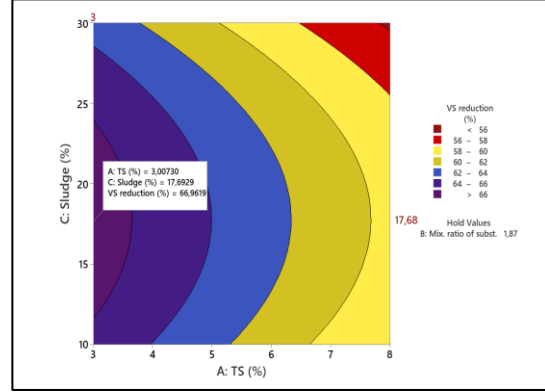
Grafiklerde görüldüğü gibi substratların karışım oranları ve çamur oranının artmasıyla UKM giderimi maksimum %66,97'e kadar artmış, sonrasında düşmeye başladığı görülmüştür.

Çizelge 3'de yer alan 3 nolu biyoreaktörde UKM giderim veriminin yüksek çıkmasının nedeni substrat karışımında %45 inek gübresinin olması ve %10 aşılama yapılmasıyla açıklanabilir. Çünkü inek gübresinde belli bir miktarda rumen sıvısı mevcuttur. Rumen sıvısı biyogaz üreten zengin mikroorganizmaları içerir ve aynı zamanda aşılama maddesi olarak kullanılır. Aşılamanın yapılması ortamdaki metanojen arke miktarını artırdığı için biyogaz üretim veriminin artmasına neden olduğu düşünülebilir. Agayev ve Ugurlu (2011) yapmış oldukları çalışmada mezofilik şartlar altında kesikli anaerobik sistemde substrat olarak at gübresini (%4 TKM) kullanmış ve 35 günlük

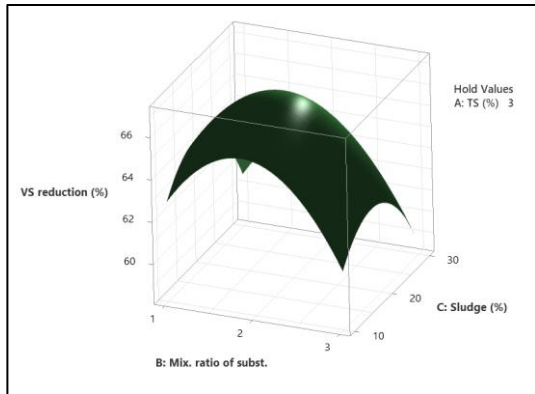
deney sonunda %90 UKM giderimi ile 410 mL/gUKM biyogaz verimi elde etmişler. Varol ve Ugurlu (2017) yılında yapmış oldukları çalışmada inek gübresi ve mısır silajının birlikte sindirimini araştırmışlardır. Spesifik biyogaz üretimi, %81-65 uçucu katı madde (UKM) giderimi ile 440 ve 320 mL/gUKM arasında elde etmişler. Mısır silajı, inek gübresi ile birlikte sindirildiğinde, spesifik biyogaz üretim oranları yaklaşık 1.2 kat arttığını bildirmişler. Bu çalışmada gerçekleştirilen deney sonuçları literatür bilgileriyle örtüşmektedir.



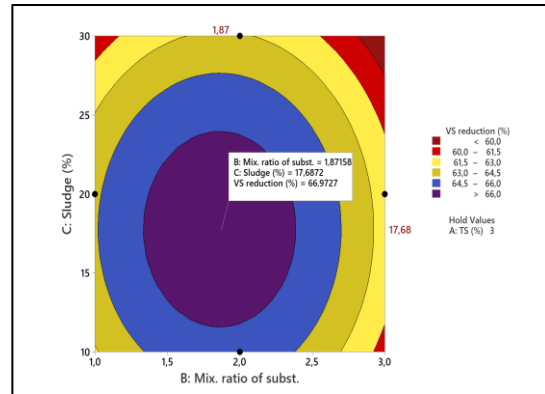
Şekil 5. UKM giderimine TKM yüzdesi ve çamur oranının etkisi



Şekil 6. UKM giderimine TKM yüzdesi ve çamur oranının etkisinin eş yüzey eğrilerle gösterimi



Şekil 7. UKM giderimine substratların karışım oranları ve çamur oranının etkisi



Şekil 8. UKM giderimine substratların karışım oranları ve çamur oranının etkisinin eş yüzey eğrilerle gösterimi

SONUÇ ve ÖNERİLER

UKM giderimi için yapılan analiz sonuçları "Minitab-21.1.1.0" programı ile istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. UKM giderimine toplam katı madde yüzdesi, substratların karışım oranları ve çamur oranlarının birlikte etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada ulaşılan en yüksek kütlece biyogaz oranı olan %66.97 için başlangıçta %3 (w/v) olarak katı maddenin alındığı, kütlece % 83'lik uçucu katı içeriğinin yine kütlece % 66.97'sinin biyogaza dönüştüğü tespit edilmiştir. UKM miktarındaki azalma ile biyoreaktörlerde oluşan gazın orantılı olarak arttığı dolayısıyla ideal katı-gaz dönüşümün gerçekleştiği görülmüştür. Bağımsız değişkenlerin etkisini gösteren grafiklere göre UKM giderimi bu bağımsız değişkenlere bağlı olarak bir maksimum nokta (%66.97) vermiştir. ANOVA testi ile elde edilen model eşitliğine bağımsız değişkenlerin ne derece etkili olduğu belirlenmiştir. p değerine bakıldığında model üzerinde etkisi en fazla olan parametreler toplam katı madde yüzdesi (A), substratların karışım oranlarının karesi (B²), çamur oranının karesi (C²), çamur oranı (C) ve substratların karışım oranları (B) olmuştur.

DeneySEL modelin öngördüğü optimum koşullar %3 toplam katı maddenin kullanıldığı, substratların karışım oranlarının %1.87 olduğu ve aşılama yüzdesinin % 17.68 olduğu çalışma şartları olarak bulunmuştur.

Araştırma sonuçlarına göre ilk karışımında inek gübresi yüzdesinin artırılmasının biyogaz veriminin arttığı, bu çalışmada kullanılan %45 inek gübresi, %25 at gübresi, %25 deve gübresi ve % 5 mısır silajının kullanıldığı

karışımın verimi daha yüksek çıkmıştır. Modelden hesaplanan sonuçlar ile deneysel çalışmadan elde edilen sonuçları karşılaştırıldığında birbirleriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Modelden elde edilen regresyon katsayısı (R^2) değeri – 0.9841'dir. Bu değer in bire yakın olması uygulanan modelin tüm deneysel çalışma sonuçlarını iyi ifade ettiğini göstermektedir. Bu çalışmanın sonuçlarının ölçek geliştirmek isteyen mühendislere, tesis kurmak isteyen girişimcilere ve farklı atık tiplerinden biyogaz üretimi çalışmaları yapan bilim insanlarına ışık tutacağı öngörülmektedir.

Teşekkür: Araştırmamıza 06/2018-30 kod nolu projeye destekte bulunan Gazi Üniversitesi BAP Birimi'ne teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması Beyanı: Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti: Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

KAYNAKLAR

- Anonim. 2019. 9.7 billion on Earth by 2050, but growth rate slowing, says new UN population report. UN News. <https://news.un.org/en/story/2019/06/1040621>. (Erişim tarihi: 17.06.2019)
- Agayev, E., and Ugurlu, A. (2011). Biogas Production from Co-Digestion of Horse Manure and Waste Sewage Sludge. *TechConnect Briefs*, 3: 657-660.
- APHA. 1998. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (20th Edition). American Public Health Association.
- Comino, E., Riggio, V. A., and Rosso, M. 2012. Biogas production by anaerobic co-digestion of cattle slurry and cheese whey. *Bioresource Technology*, 114: 46-53. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.02.090>
- Coşkun, T., Manav, N., Debik, E., Binici, M.S., Tosun, C., Mehmetli, E., ve Baban, A. 2011. Büyükbaş Hayvan Atıklarının Anaerobik Çürütülmesi. *Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 2(3): 1-9.
- Cudjoe, D., Chen, W., and Zhu, B. 2022. Valorization of food waste into hydrogen: Energy potential, economic feasibility and environmental impact analysis. *Fuel*, 324: 124476. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124476>
- Çağlayan, G. H. 2020. Doğu Anadolu Bölgesindeki Büyükbaş ve Küçükbaş Hayvan Atıklarının Biyogaz Potansiyelinin İncelenmesi. *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 7(3): 672-681. <https://doi.org/10.30910/turkjans.699879>
- Çanka Kılıç, F. 2011. Biyogaz, Önemi, Genel Durumu ve Türkiye'deki Yeri. *Mühendis ve Makina*, 52: 94-106.
- Djimtoingar, S. S., Derkyi, N. S. A., Kuranchie, F. A., and Yankyera, J. K. 2022. A review of response surface methodology for biogas process optimization. *Cogent Engineering*, 9(1): 2115283. <https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2115283>
- Ekinci, M.S. ve Mutlu, S.F. 2009. Tavuk Dışkılarının Anaerobik Arıtımında İstatistiksel Teknik Kullanılarak En Uygun Koşulların Belirlenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*. 24(4): 687-692
- Işık, S. ve Yavuz, S. 2022. Biyokütleden Elde Edilen Biyoyakıtlara Genel Bir Bakış. *European Journal of Science and Technology*. 34: 193-201. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1079255>
- Kadam, R., and Panwar, N.L. 2017. Recent advancement in biogas enrichment and its applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73: 892-903.
- Kakar, D. R. 2016. Camels' Manure From Waste to a Worthwhile Farming Agent. <https://arkbiodiv.com/2016/02/02/camels-dungzfrom-waste-to-a-worthwhile-farming-agent/>. (Erişim tarihi: 02.02.2016)
- Karataş, A. 2006. Tavuk gübresinin Anaerobik parçalanması için uygun Koşulların belirlenmesi. Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Khattree, R. and Rao, C. R. 2003. *Statistics in industry* (C. 22). Gulf Professional Publishing. <https://www.biblio.com/9780444506146>
- Khuri, A. I., and Mukhopadhyay, S. 2010. Response surface methodology. *WIREs Computational Statistics*, 2(2): 128-149. <https://doi.org/10.1002/wics.73>
- Öztürk, H. ve Kaya, D. 2012. Biyogaz Teknolojisi (Kocatepe). Umuttepe Yayınları.
- Pizzuti, L., Martins, C.A., and Lacava, P.T. 2016. Laminar burning velocity and flammability limits in biogas: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62: 856-865.
- Rawat, I. 2011. Dual role of microalgae: Phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production. *Applied Energy*, 88: 3411-3424.

- Rubio, J. A., Fdez-Güelfo, L. A., Romero-García, L. I., Wilkie, A. C. and García-Morales, J. L. 2022. Co-digestion of two-phase olive-mill waste and cattle manure: Influence of solids content on process performance. *Fuel*, 322: 124187. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124187>
- Sarabia, L. A. and Ortiz, M. C. 2009. 1.12 - Response Surface Methodology.
- Brown, S. D., Tauler, R. and Walczak, B. (Ed.), *Comprehensive Chemometrics* (pp. 345-390). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-044452701-1.00083-1>
- Topal Canbaz, G. ve Polat Bulut, A. 2021. İç Anadolu Bölgesinde Bulunan Hayvansal Atıkların Biyogaz Potansiyelinin İncelenmesi. *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*. 8(4): 905-912. <https://doi.org/10.30910/turkjans.833381>
- TÜİK. 2021. Hayvansal Üretim İstatistikleri. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Hayvansal-Uretim-Istatistikleri-Aralik-2021-45593>. (Erişim tarihi: 03.08.2022).
- Varol, A., and Ugurlu, A. (2017). Comparative evaluation of biogas production from dairy manure and co-digestion with maize silage by CSTR and new anaerobic hybrid reactor. *Engineering in Life Sciences*, 17(4): 402-412. <https://doi.org/10.1002/elsc.201500187>.
- Zacharias, A. 2019. How camel waste is fuelling the UAE's circular economy. *The National*. <https://www.thenationalnews.com/uae/environment/how-camel-waste-is-fuelling-the-uae-s-circular-economy-1.877698>. (Erişim tarihi: 28.05.2022).
- Zhang, B., Zhao, H., Yu, H., Chen, D., Li, X., Wang, W., and Cui, R. P. and Z. 2016. Evaluation of Biogas Production Performance and Archaeal Microbial Dynamics of Corn Straw during Anaerobic Co-Digestion with Cattle Manure Liquid. *Journal of Microbiology and Biotechnology*. 26(4): 739-747. <https://doi.org/10.4014/jmb.1509.09043>