

Yapay sulakalan sisteminde fosfor giderimine ortam malzemesinin etkisi

Sönmez DAĞLI*, Lütfi AKÇA

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Bilimleri ve Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Bu çalışmada, fosforun yapay sulakalan sistemlerinde giderimi incelenmiş, ortam malzemesinin giderim verimine olan etkisi adsorpsiyon izotermeleri ile açıklanmaya çalışılmıştır. Bu etkinin anlaşılabilmesi için ortam malzemesi olarak toprak, demir-çelik endüstrisi yüksek fırın cürufu, perlit, çakıl ve kum kullanılmıştır. Dane büyüklüğü açısından çakıldan sonra en iri yapılı malzemeler sırası ile cüruf, perlit, toprak ve kum olarak bulunmuştur. Atomik absorpsiyon spektrometre analizlerine göre en fazla katyon içeren malzeme, her üç katyonu da (Al, Fe, Ca) içeren yüksek fırın cürufu olarak belirlenmiştir. Yüksek fırın cürufunu sırası ile çakıl, toprak, kum ve perlit izlemektedir. Ancak her bir katyon için değerlendirme yapıldığında Ca içeriği en yüksek malzemeler çakıl ve yüksek fırın cürufu'dur. Fe içeriği en yüksek malzeme yüksek fırın cürufu; Al içeriği en yüksek malzeme ise toprak ve yüksek fırın cürufu'dur. X ışını difraktometre cihazı ile yapılan tam element analizi ile bulunan sonuçlar, atomik absorpsiyon spektrometresi sonuçları ile benzerlik göstermiş, fosfor tutulması açısından en umut verici malzemeler cüruf, çakıl, toprak ve kum olarak bulunmuştur. Sulakalanlarda kullanılma potansiyeli olan yüksek fırın cürufu, kum, çakıl, toprak ve perlitin 21 °C ve 4 °C'de yaz ve kış şartlarında adsorpsiyon denge zamanı, Jar-Test düzeneğinde gerçekleştirilen deneyler ile tespit edilmiştir. Aynı düzenek kullanılarak yukarıda verilen ortam malzemelerinin 21 °C ve 4 °C'de, 12 mg/l toplam fosfor (TP) konsantrasyonu için Freundlich, Langmuir ve BET izotermine uygunluğu araştırılmıştır. Kullanılan malzemelerin tümünün Langmuir izotermine uygun adsorpsiyon davranışı gösterdiği saptanmıştır.

Anahtar kelimeler: Langmuir izotermi, yapay sulakalan, fosfor, adsorpsiyon.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Sönmez DAĞLI. Sonmez.Dagli@mam.gov.tr; Tel: (262) 677 29 54.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Bilimleri ve Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "Evsel atıksulardan yapay sulakalanlarda fosfor gideriminin incelenmesi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 13.07.2006 tarihinde dergiye ulaşılmış, 08.02.2007 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.06.2007 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

The effect of media material to phosphorus removal on constructed wetlands

Extended abstract

Constructed wetland systems, a low cost and low technology option, have been successfully used for recycling and managing domestic and different types of industrial wastewater. The capacity of these systems is widely documented and because of their relative low cost, easy operation and maintenance the use of constructed wetlands as wastewater management solution, has extended rapidly as a choice for treatment of domestic wastewater. Such naturalized treatment systems have been shown to have a significant capacity for both wastewater treatment and resource recovery. Most studies on constructed wetlands have focused mainly on the net removal of pollutants such as bacteria, suspended solids, biological oxygen demand and nutrients such as nitrogen and phosphorus from wastewater. Although such studies have generally confirmed the effectiveness of constructed wetlands for pollutants removal, they provide little information on the processes involved in pollutant removal. The mechanisms of phosphorus removal in constructed wetlands are incompletely understood. Settling and retention of particulate forms of phosphorus is generally considerable in the slow moving waters of wetlands. Uptake of soluble forms of phosphorus occurs by sorption, complexation, precipitation and assimilation into microbial and plant biomass. In this study, removal of phosphorus, which is one of the most important elements in wastewater and causes to eutrophication was examined; the effect of media material on removal efficiency were detailed investigated.

The mechanisms of phosphorus removal in constructed wetlands such as adsorption (onto media material), precipitation, plant uptake, system geometry, climate, wastewater composition are insufficiently understood. As to the removal mechanisms for P also include biological transformations. Although wetland capacity to remove pollutants is considered good, water quality discharge limits are becoming more stringent; and therefore the performance demand of constructed wetlands capacity is increasing. The discharge of nutrients to the environment is one of the water quality parameters that are becoming increasingly restricted, since nutrients are responsible for eutrophication of waters. The capacity of constructed wetlands to remove phosphorus is an issue that has not been satisfactorily solved. The aim of this study is to understand the effect of media material on phosphorus removal on

constructed wetlands. To understand this effect, the Jar-Test system was fed batch and all supernatant analysis after one hour settling time was made according to standard methods.

As the media material the most important parameter in constructed wetlands, its effect on phosphorus removal efficiency was explored by means of adsorption experiments. Soil, slag, perlite, gravel and sea sand were selected as media materials in this experimental study. Soil was provided from a construction site, slag was supplied from iron and steel foundry, perlite obtained from mine, gravel was provided from Municipality of Gebze, sea sand was taken from Gebze seaside. According to the sieve analysis, perlite was found as the most uniform and suitable material for the study. The others were exhibited changeable grain size distribution.

To determine the effect of cation contents of the materials which is considered very important in the literature, atomic absorption spectrometer analysis was conducted on the materials. According to the results of this analysis, slag was evaluated the most suitable material as it contains all three cations (Al, Fe, Ca). Gravel, soil, sea sand and perlite are followed to the slag. The element analysis showed that gravel and slag have the highest amount of iron among the tested materials; slag has the highest aluminium content. Therefore it is decided that slag, gravel and soil are the most proper media materials for the adsorption of phosphorus.

Equilibrium times of all materials used in the wetlands were determined under summer and winter conditions (21 °C and 4 °C) using Jar-Test equipment. The experiments were conducted on at constant temperature for each condition. The reactor was continuously mixed at 50 rpm until the system reached to equilibrium. The suitability of the materials to Freundlich, Langmuir and BET isotherms are searched by using the same jar-test equipment for 12 mg/l total phosphorus concentration as for representing medium organic loaded wastewater. The results of the adsorption experiments indicated that isotherms obtained for all materials used in this study fit Langmuir isotherm.

According to these findings, soil, slag and sea sand has been evaluated most promising media materials either phosphorus adsorption capacity or easy and fast availability.

Keywords: Langmuir isotherm, constructed wetland, phosphorus adsorption.

Giriş

Yapay sulakalanlar, doğal arıtmanın mühendislik tasarımı ile daha küçük reaktörlerde cereyan ettiği kontrollü sistemlerdir. 1920'lerden itibaren yerini konvansiyonel arıtma sistemlerine bırakmaya başlayan doğal arıtma sistemleri, Almanya, Fransa ve ABD gibi gelişmiş ülkelerde enerji gerektirmemesi ve arazi ihtiyacının azlığı sebebiyle son yıllarda yeniden cazip hale gelmeye başlamıştır (Vymazal vd., 1998). Masi (2005) çalışmasında halen Almanya'da 5000, İngiltere'de 800, Avusturya'da 500, Danimarka'da 300, İtalya'da 300, Çek Cumhuriyetinde 160, Portekiz ve Polonya'da 120, Fransa'da 100 civarında yapay sulakalanın halihazırda kullanıldığını belirtmektedir.

Avrupa Birliği adaylık sürecinde bulunan ülkemizi de ilgilendiren, Su Politikası Alanında Topluluk Faaliyeti için bir Çalışma Çerçevesi Oluşturan 23 Ekim 2000 tarihli ve 2000/60/EC sayılı Su Çerçeve Direktifi (Water Framework Directive), iç yerüstü sularının, geçiş sularının, kıyı sularının ve yeraltı sularının korunması için bir çerçeve oluşturmayı amaçlamıştır. Direktifin 4. ve 5. maddesinde nehir havzalarının; 7. maddesinde ise içme suyu amaçlı kullanılan tüm yerüstü ve yeraltı su kaynaklarının topluluk ülkelerinde korunması ve sürdürülebilir kullanımının sağlanması öngörülmektedir. Bu amaçla üye ülkelerin su koruma havzaları için koruma ve izleme planları yapmaları ve bunları uygulamaları istenmektedir. Aynı direktifin 4. maddesinin 5. bendinde ise koruma planlarının uygulanamayacak kadar pahalı olması durumunda benzer çevresel önceliklere sahip daha pratik ve ucuz yöntemlerin araştırılması tavsiye edilmektedir.

Sulakalanlar şehirselleşen, endüstriyel ve zirai deşarjların arıtımında kullanılan çok düşük masraflı alternatifler olarak göz önünde bulundurulmaktadır. Bunun yanında sulakalanların asit maden yatağı sularının arıtımında, yağmur suyu arıtımında da kullanım alanları bulunmaktadır (Kadlec ve Knight, 1996). Günümüzde dünyaya yayılmış ve sulakalan temelli binlerce atıksu arıtım sistemleri mevcuttur. Son 10 yıl içerisinde sulak alanların BOİ, nütrientler, sınırlı derecede metal ve toksik organik bileşiklerin giderilmesi,

mühendislik değerlendirmesi ve tasarım kriterleri, optimizasyon ve maliyet değerlendirilmesi hakkında çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir (Uğurlu ve Salman, 1998).

Özellikle gelişmekte olan ve ılıman iklim kuşağında yer alan ülkeler için uygun olan bu sistemler, düşük işletme ve bakım masraflarının yanında çamur üretimlerinin de yok denecek kadar az olması sebebiyle tercih edilmektedir (Ayaz ve Saygın, 1996).

Bu çalışmada yapay sulakalanlarda fosfor arıtımında önemli parametrelerden biri olan ortam malzemesinin giderme verimine etkisi adsorpsiyon izotermi ile açıklanmaya çalışılmıştır. Bu amaç doğrultusunda çakıl, kum, yüksek fırın cürufu, perlit ve toprak malzemeleri, fosfor giderimi üzerindeki etkisinin anlaşılması için laboratuvar ortamında Jar-Test deneylerine tabi tutulmuştur.

Materyal ve metod

Adsorpsiyon deneyleri için orta kuvvette evsel atıksuyu temsil etmesi açısından 12 mg/L toplam fosfor konsantrasyonuna sahip, 0.1 g glikoz, 0.001 g maya ekstraktı, süttozu, üre, 0.15 g amonyum klorür (NH_4Cl), 0.08 g sodyum dihidrojen fosfat ($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$), 0.01 g potasyum bikarbonat (KHCO_3), 0.1 g sodyum bikarbonat (NaHCO_3), 0.09 g magnezyum sülfat ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), 5 g demir sülfat ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), 0.09 g mangan sülfat ($\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), 0.014 g kalsiyum klorür ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), 0.1 g bentonit içeren sentetik atıksu numunesi kullanılmıştır.

Bu maddelerden hazırlanmış 100 mg/L toplam fosfor içeren stok sentetik numune, içeriği 12 mg/L olacak oranda seyreltilerek deneylerde kullanılmıştır.

Jar-Test ile tutulma deneyleri, Şekil 1'de görülen düzeneğin dönüş hızının 50 rpm'e ayarlandığı durumda, ortam sıcaklığının yaz şartları için 21 °C' ye; kış şartları için 4 °C' ye ayarlanması ile gerçekleştirilmiştir. 1 litrelik cam beherlere konulan sentetik numune her bir malzemenin 10 gramı ilave edilmiş ve her 12 saatte bir üst duru fazda toplam fosfor konsantrasyon-

ları ölçülmüştür. Fosfor analizi Standart Yöntemler'e (APHA, Standard Methods, 1998) göre yapılmıştır.



Şekil 1. Jar-test düzeneği

Adsorpsiyon deneylerinde kullanılan malzemelerin fiziksel özelliklerini karşılaştırmak üzere elek analizi otomatik çalkalama özelliğine sahip Karl Kolb marka elekte yapılmıştır. Emniyetli çalışma açısından cihaza her bir deneyde 2 adet elek takılmış, her bir eleme işlemi cihazın zamanlayıcısı 5 dakikaya ayarlanarak gerçekleştirilmiştir.

Malzemelerin katyon içeriğinin etkisini görmek amacı ile atomik absorpsiyon spektrometresi (AAS) analizleri yapılmıştır. Katyon (metal) analizleri malzemelerin öğütücüde öğütülmesini takiben kuvvetli asit ile çözülerek Varian marka AAS cihazında alev modunda okunması şeklinde gerçekleştirilmiştir.

Malzemelerin atıksu arıtımındaki etkinliğinin tam olarak değerlendirilmesi ve olası diğer ağır metal içeriklerinin bulunması amacı ile Philips marka X-Ray Difraktometre cihazı ile tam element analizi de yapılmıştır.

Deneysel çalışma sonuçları

Adsorpsiyon deneylerinde kullanılan malzemelerin elek analizi sonucu bulunan dane boyut dağılımları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Sistemlerde kullanılan malzemelerin dane boyutları

Malzeme	-1	+1	+2	+2.8	+4	+5.6
	mm	mm	mm	mm	mm	mm
	%	%	%	%	%	%
Çakıl	0.52	0.07	0.6	7.21	13.95	77.6
Cüruf	13.02	20.01	12.98	12.75	7.24	34
Malzeme	-0.25	+0.25	+0.5	+1	+2	+4
	mm	mm	mm	mm	mm	mm
	%	%	%	%	%	%
Kum	6.9	24.6	28.7	19.3	15.2	5.3
Perlit	0	0	14	35	48	0
Toprak	11.1	27.3	25.5	17.3	9.4	9.4

Tablo 1'e göre en düzenli (üniform) dane boyutuna sahip ortam malzemesi perlit olarak belirlenmiştir. Ancak bunun sebebi perlitin ticari olarak eşit dane boyunda üretilmesidir. Diğer bütün malzemelerin dane boyutu değişkendir. Dane büyüklüğü açısından çakıldan sonra en iri yapıları malzemeler sırası ile cüruf, perlit, toprak ve kum'dur.

Deneysel çalışmada kullanılan malzemelere ait AAS analiz sonuçları ise Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Seçilen malzemelerin katyon içerikleri

Ortam	Al İçeriği	Fe İçeriği	Ca İçeriği
Malzemesi	g/kg	g/kg	g/kg
Toprak	40.10	34.10	48.90
Çakıl	6.90	4.20	336.00
Perlit	1.27	1.55	1.05
Kum	12.20	13.85	37.70
Cüruf	28.50	222.90	212.70

Tablo 2'deki sonuçlara göre en fazla katyon içeren malzeme her üç katyonu da içeren yüksek fırın cürufu olarak gözükmektedir. Yüksek fırın cürufunu sırası ile çakıl, toprak, kum ve perlit izlemektedir. Ancak her bir katyon için değerlendirme yapıldığında kalsiyum içeriği en yük-

sek malzemeler çakıl ve yüksek fırın cürufu'dur. Demir içeriği en yüksek malzeme yüksek fırın cürufu; alüminyum içeriği en yüksek malzeme ise toprak ve yüksek fırın cürufu'dur. Tablo 2'den de görüleceği gibi en umut verici malzemeler yüksek fırın cürufu, çakıl ve toprak olarak sıralanabilmektedir.

Deneysel çalışmada kullanılan perlit dışındaki diğer malzemelerin atıksu arıtımındaki etkinliğinin tam olarak değerlendirilmesi ve olası diğer ağır metal içeriklerinin belirlenmesi amacı ile X-Ray Difraktometre cihazı ile element analizi de yapılmıştır. Perlit analiz sırasında presleme sonucu eridiğinden bu malzeme için sonuç alınamamıştır. Philips marka PW2004 model XRF cihazı ile bulunan sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3'te verilen sonuçlar, Tablo 2'dekilerle benzerlik göstermekte olup, fosfor tutulması açısından en umut verici malzemeler yine cüruf, çakıl, toprak ve kum olarak sıralanmaktadır. Bu sonuçlardan malzemelerin önemli oranda ağır metal içermediği de görülmektedir. Tablo 3'teki XRF analizi değerlerinin AAS değerlerinden bir miktar daha yüksek olmasının sebebi AAS cihazının odaklanan metali hassas olarak ölçmesi, XRF cihazının ise malzemedeki tüm metalleri taraması şeklinde izah edilebilmektedir.

Adsorpsiyonu incelemek için kullanılan en uygun gösterimler izoterm eğrileridir. Sabit sıcaklıkta adsorban tarafından adsorplanan madde miktarı ile denge basıncı veya konsantrasyonu arasındaki bağıntıya adsorpsiyon izotermi adı verilmektedir. Diğer bir ifadeyle, izoterm ile adsorban ve adsorplanacak madde arasındaki ilişki anlaşılmaktadır. İzoterm eğrileri ampirik olarak belirlenmekte fakat matematiksel olarak ifade edilmektedir. İzotermiler sabit sıcaklıkta adsorbanın birim kütlede adsorbe olan maddenin adsorplanacak maddenin bağıl konsantrasyonuna karşı çizilmektedir.

Genellikle adsorban ile adsorbat arasında meydana gelen kuvvetli bir afinite (kimyasal adsorpsiyon) Langmuir izotermi ile, basit fiziksel adsorpsiyon ise Freundlich izotermi ile ifade edilmektedir (Apak vd., 1991).

Tablo 3. Seçili malzemelerin XRF sonuçları

Element	Çakıl (%)	Kum (%)	Toprak (%)	Cüruf (%)
Al	1.933	6.249	9.920	4.749
Ba	0.058	0.074	0.065	0.179
Ca	55.286	6.006	6.030	21.340
Cl	0.055	0.022	0	0.072
Fe	1.467	1.811	3.529	19.449
K	0.669	1.501	1.779	0.039
Mg	0.677	0.711	1.025	1.561
Mn	0.116	0.047	0.123	3.570
Na	0.058	0.532	0.321	0.066
O	32.817	48.715	47.534	37.102
P	0.054	0.065	0.068	0.249
Rb	0.003	0.005	0.009	0
S	0.218	0.039	0.029	0.155
Si	6.320	33.958	29.084	10.25
Sr	0.077	0.022	0.017	0.019
Ti	0.144	0.199	0.392	0.261
Y	0.002	0.002	0.007	0.054
Zn	0.027	0.003	0.008	0.017

Kullanılan malzemelerin yaz ve kış şartlarında adsorpsiyon denge zamanını tespit etmek için 21 °C ve 4 °C'de yapılan laboratuvar deney sonuçları Tablo 4'te verilmiştir. Deneyler sırasında ortam sıcaklığı dijital klima ile sabit tutulmuştur.

Tablo 4'ten de görüldüğü üzere ortamda kalan TP konsantrasyonlarında ilk 5 saatte hızlı bir düşüş meydana gelmekte, bundan sonra gözlem süresi olan 120 saate kadar yavaş ta olsa düşüşler devam etmektedir. İncelenen malzemelerin çoğunlukla dengeye ulaşma süresi 96 saatin üzerindedir. Çakıl malzemesinin her denge süresi 120 saatin üzerindedir. Toprak ve perlit için düşük sıcaklıkta denge süresi 120 saatten fazla, yüksek sıcaklıkta ise 96 saat olarak gözlenmiştir.

tir. İncelenen malzemelerden yüksek fırın cürufunda fosfor tutulmasının dengeye ulaşma süresi diğer malzemelere göre belirgin şekilde düşük çıkmıştır. Özellikle düşük sıcaklıkta (4 °C) 24 saatlik sürede denge konsantrasyonuna ulaşmıştır.

Tablo 4. Malzemelerin 21°C ve 4°C'de denge zamanları

Zaman (saat)	Toplam Fosfor (mg P/L)				
	Çakıl	Kum	Cüruf	Perlit	Toprak
21°C					
0	12	12	12	12	12
1	10.2	10.5	10.2	11.5	10.2
5	10.1	10.0	9.6	11	9.2
24	9.9	9.6	9.0	10.6	8.8
48	9.6	8.8	8.1	10.0	8
72	8.8	8.1	7.2	9.6	7.5
96	8.5	7.8	6.4	8.8	7.0
120	8.0	7.5	6.0	8.6	6.7
4°C					
0	12	12	12	12	12
1	10.9	10.6	10.2	11.2	10.3
5	10.2	10.2	9.9	11.0	9.6
24	9.9	10.0	8.6	10.7	9.1
48	9.2	9.3	8.2	10.3	8.6
72	9.0	8.8	8.0	10.0	8.1
96	8.8	8.3	7.9	9.6	7.9
120	8.2	8.1	7.6	9.1	7.5

İzoterm ve malzemelerin davranışları

Teorik yaklaşımlar kullanılarak tüm adsorpsiyon izoterm türleri için uygun genel bir eşitlik bulunmamaktadır. Adsorpsiyon izotermi genelde beş tip olarak sınıflandırılmaktadır (Berkem ve Baykut, 1998). Her bir tip izoterm için uygun olduğu eşitlik farklıdır (Brauner ve Preisinger, 1956).

Laboratuvar şartlarında 21 °C'de ve 4 °C'de tüm malzemeler için elde edilen grafikler değerlendirilmiş; Freundlich ve Brauner-Emmett-Teller (BET) izotermine uygun olmadığı görülmüştür.

Langmuir izotermi ve malzemelerin davranışı

Langmuir tarafından geliştirilen teoriye göre

atom veya moleküller adsorplayıcı yüzeyinde aktif merkezler tarafından tutulmakta ve bu tutulma tek tabaka halinde gerçekleşmektedir.

$$y = \frac{a.C_d}{1 + b.C_d} \quad (1)$$

Bu formüle,

y : belirli bir adsorban kütlesi tarafından adsorplanan madde miktarı, (mg/mg)

C_d : adsorplanan maddenin denge konsantrasyonu, (mg/L)

a, b : reaksiyon sabitleri

olarak verilmektedir. Denklem 1'in her iki tarafı C_d 'ye bölünürse,

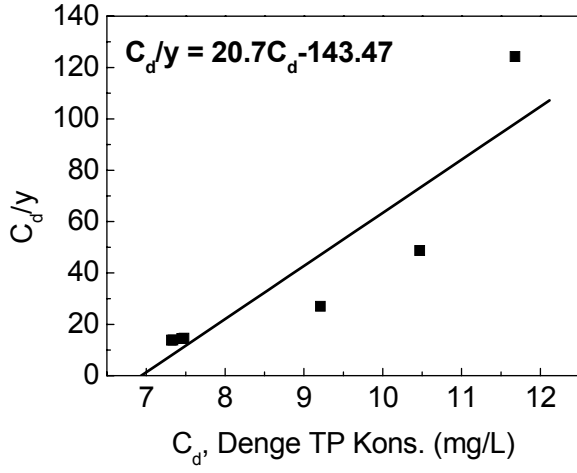
$$\frac{C_d}{y} = \frac{1}{a} + \left(\frac{b}{a}\right)C_d \quad (2)$$

eşitliği elde edilmektedir. Absiste C_d , ordinatta C_d/y değerleri kullanılarak çizilen grafiğin doğru şeklinde olması, gerçekleşen adsorpsiyonun Langmuir izotermine uygunluğunu göstermektedir. Doğrunun ordinatı kesim noktasından $1/a$; eğiminden ise b/a değeri elde edilmektedir.

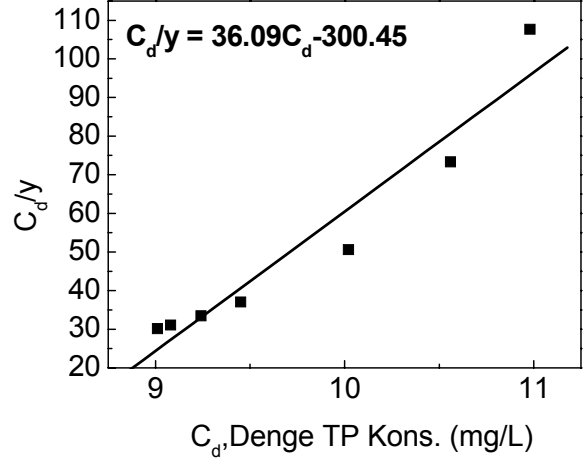
Toplam fosfor için Langmuir izotermi

12 mg/l toplam fosfor içeren sentetik numune ile elde edilen deney sonuçları Şekil 2 ile Şekil 11 arasında toplu halde gösterilmiştir.

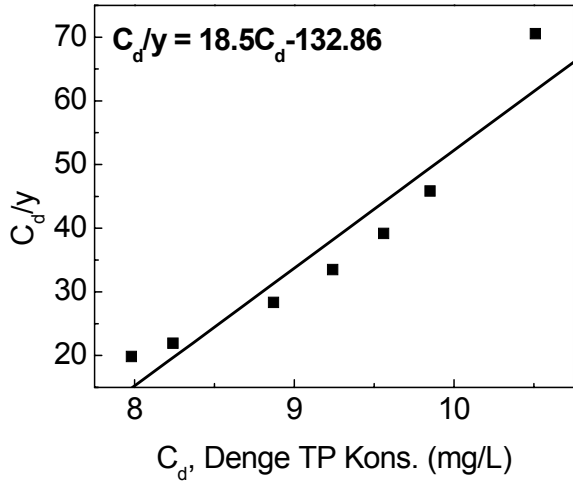
Şekil 2-11 incelendiğinde, malzemelerin gerek 21°C'de gerekse 4°C'de genellikle Langmuir izotermine uygun davrandığı görülmektedir. Çakıl ve kum için 21°C'de elde edilen grafiklerin Langmuir izotermine kısmen uygun olduğu gözlemlenmektedir. Malzemeler tarafından giderilecek fosforun hesabı izoterm aracılığı ile sudaki fosfor konsantrasyonu ile ilişkilendirilebilmektedir. Bir katı madde üzerinde tutulmuş fosfor konsantrasyonunun hangi izotermine uygun olduğu belirlendikten sonra ortam malzemesi üzerinde fosfor tutulma kapasitesi de bulunan izoterm denkleminde hesaplanabilmektedir.



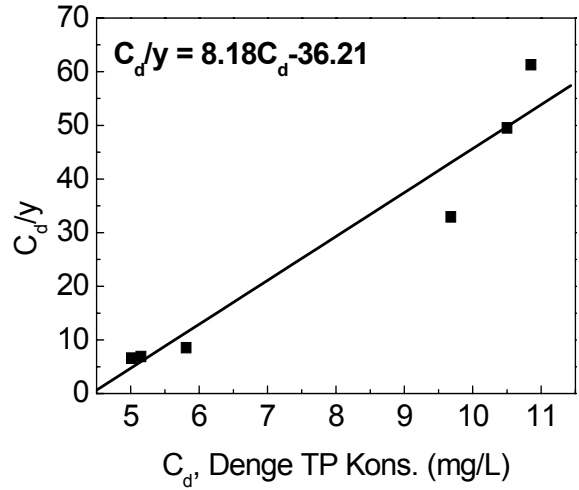
Şekil 2. Toprak için 21 °C'de Langmuir izotermini



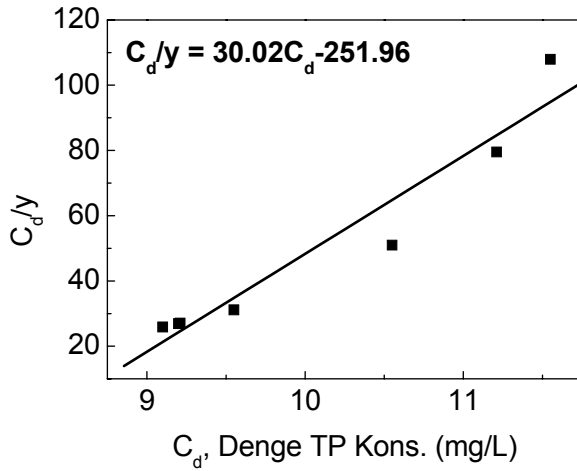
Şekil 5. Perlit için 4 °C 'deLangmuir izotermini



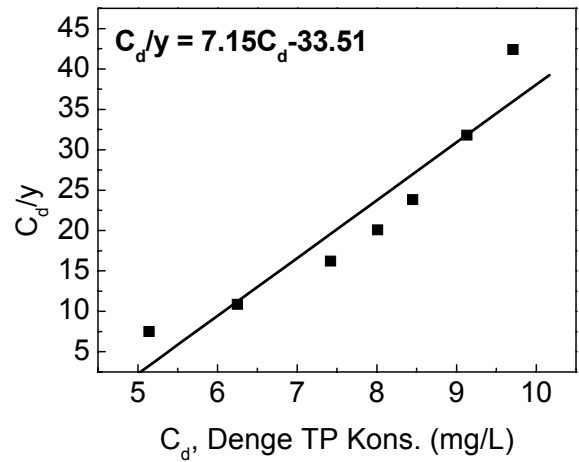
Şekil 3. Toprak için 4 °C 'de Langmuir izotermini



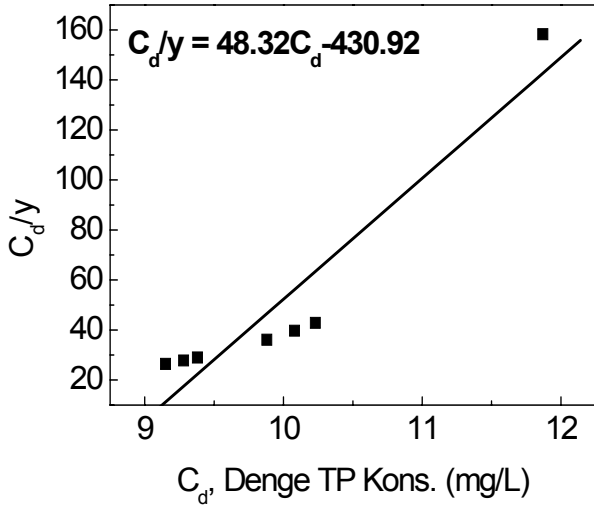
Şekil 6. Cüruf için 21 °C'de Langmuir izotermini



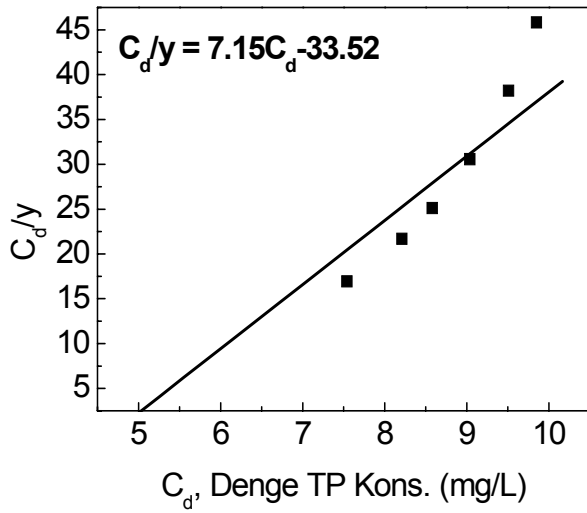
Şekil 4. Perlit için 21 °C'de Langmuir izotermini



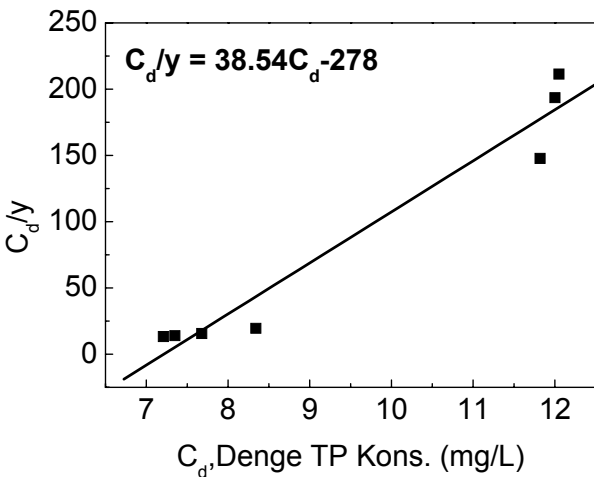
Şekil 7. Cüruf için 4 °C'de Langmuir izotermini



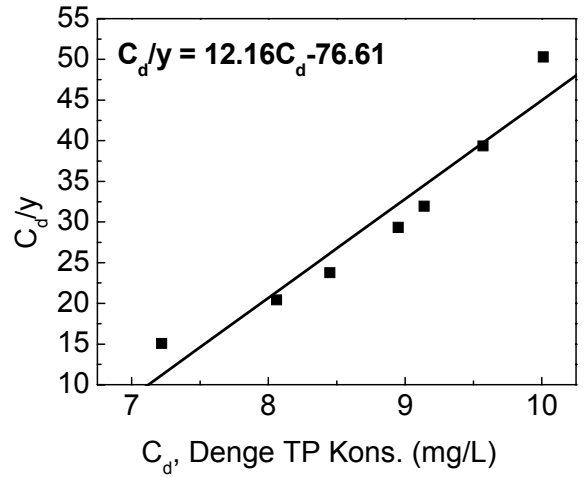
Şekil 8. Çakıl için 21 °C'de Langmuir izotermi



Şekil 9. Çakıl için 4 °C'de Langmuir izotermi



Şekil 10. Kum için 21 °C'de Langmuir izotermi



Şekil 11. Kum için 4 °C'de Langmuir izotermi

Şekil 1-10'dan bulunan izoterm sabitleri ve tutulma eşitlikleri kullanılarak 21 °C ve 4 °C'de elde edilen tutulma miktarları Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. 21 °C ve 4 °C'de tutulan TP miktarları

Malzeme	21 °C mg P/kg	4 °C mg P/kg
Toprak	1363	239
Perlit	20	17
Cüruf	458	363
Çakıl	111	324
Kum	669	367

Tablo 5'e göre bir değerlendirme yapıldığında, 21°C'de elde edilen tutulmanın 4°C'de elde edildenden daha fazla olduğu söylenebilmektedir. Bu durum çakıl için tam tersi olarak gerçekleşmiştir. 21 °C'de en fazla tutulma toprak tarafında gerçekleştirilmiş, bunu kum ve cüruf izlemiştir. 4 °C'de ise en fazla tutulmayı kum, cüruf ve çakıl gerçekleştirmiş, bunları toprak ve perlit izlemiştir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Yüksek fırın cürufu, üç katyonu da (Al 28.5 g/kg, Fe 222.9 g/kg, Ca 212.7 g/kg) en fazla içeren malzeme olarak belirlenmiştir. Yüksek

sek fırın cürufunu sırası ile çakıl, toprak, kum ve perlit izlemektedir. Ancak her bir katyon için değerlendirme yapıldığında kalsiyum içeriği en yüksek malzemeler çakıl ve yüksek fırın cürufudur. Demir içeriği en yüksek malzeme yüksek fırın cürufu; alüminyum içeriği en yüksek malzeme ise toprak ve yüksek fırın cürufu'dur. Dolayısıyla yapay sulakalanda dolgu malzemesi olarak kullanılmak üzere katyon içeriği bakımından en umut verici malzemeler yüksek fırın cürufu, çakıl ve toprak olarak değerlendirilmektedir.

- Arazide tesis edilen pilot ölçekli sulakalanlarda kullanılan malzemelerin 21 °C ve 4 °C'deki adsorpsiyon izotermine göre, tüm malzemelerin Langmuir izotermine kısmen uygun davranış gösterdiği gözlenmiştir. Katyon içeriği en yüksek malzeme olan cürufun Langmuir izotermine uyumu da diğer malzemelere göre daha iyi olarak gözükmektedir.
- 21°C'de elde edilen fosfor tutulması, 4°C'de elde edilenden daha fazladır. Her iki sıcaklık değerinde de birbirine yakın tutulma elde edilen malzemeler kum (669 mg P/kg, 367 mg P/kg) ve cüruf'tur (458 mg P/kg, 363mg P/kg). Toprak 21°C'de iyi bir tutulma (1363 mg P/kg) sağlmasına rağmen 40°C'de daha düşük performans (239 mg P/kg) göstermiştir. Perlit, her iki sıcaklık değerinde de zayıf tutulma (20 mg P/kg, 17 mg P/kg) sağlayabilmiştir. Çakıl ise tüm malzemelerin aksine 21°C'de daha az tutulma (111 mg P/kg) sağlamış, 4°C'de ise daha fazla fosfor (324 mg P/kg) tutmuştur.

Bu sonuçlara göre toprak, cüruf ve kum gerek fosfor tutma kabiliyeti gerekse kolay ve ucuz

bulunabilirliği sebebiyle fosfor gideriminde kullanılabilir malzemeler olarak değerlendirilmiştir.

Kaynaklar

- Apak, R., Tütem, E., Hugül, M., Kar, F., (1991). *Suların arıtılması*, TÜBİTAK Proje No:KTÇAG-7, s.22-23, Ankara.
- Ayaz Ç.S. ve Saygın Ö., (1996). Hydroponic wastewater treatment garden, 9th International Association on Water Quality Conference, 11-12, Vienna.
- Berkem A.R., Baykut, S., (1998). *Fizikokimya*, İstanbul Üniversitesi Yayınları, 42, Kimya Fakültesi, İstanbul.
- Brauner, K., Preisinger, A., (1956). Struktur und Entstehung des sepioliths, *Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, **25**, 6, 120-140.
- European Union Water Framework Directive, (2000). 2000/60/EC, Luxemburg.
- Hosomi, M., Murakami, A., and Sudo, R., (1994). A four year mass balance for a natural wetland system receiving domestic wastewater, *Water Science and Technology*, **30**, 8, 235-244.
- Kadlec, R.H., ve Knight, L.R., (1996). *Treatment wetlands*, CRC Press, The University of Michigan, 151, Ann Arbor and Wetland Management Services Chelsea, Michigan.
- Masi, Fabio, (2005). Training course notes on constructed wetlands, MRC-Gebze, Kocaeli, Turkey.
- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 1998. 4500- P A, 4500- P B; 4500-P D. Stannous Chloride Method (20th Edition), APHA, *American Water Works Association*, USA.
- Uğurlu A. ve Salman B., (1998). Phosphorus removal by fly ash, *Environment International*, **24**, 8, 911-918.
- Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P. F., Green, M. B., Haberl, R., (1998). *Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe*, 18, Backhuys Publishers, Leiden.