

Adıyaman Çamgazi Ovası Topraklarında Fosfor Adsorpsiyonunun Değişik İzotermlerle Belirlenmesi

Necat AĞCA

MKÜ. Ziraat Fakültesi, Toprak Bölümü, Antakya, Hatay-TÜRKİYE

Mehmet Rifat DERİCİ

Ç.Ü. Ziraat Fakültesi Toprak, Bölümü, Adana-TÜRKİYE

Geliş Tarihi: 9.4.1997

Özet: Adıyaman Çamgazi ovasının 8 yaygın toprak serisinden alınan toprak örnekleri fosfor konsantrasyonları 0-50 µg/ml arasında değişen 16 farklı çözelti ile çalkalama tipi denemelerle sabit sıcaklıkta dengeye getirilmişlerdir. Denge çözeltilerinin fosfor konsantrasyonları ve bu konsantrasyonlarda topraklar tarafından tutulan fosfor miktarları belirlenmiştir. Deneyler sonucunda bulunan bu adsorpsiyon verileri çeşitli adsorpsiyon izotermleri kullanılarak değerlendirilmiş, bu izotermlerin en iyi uyum sağladığı konsantrasyon aralıkları istatistiksel yönden araştırılmıştır.

Determination of Phosphorus Adsorption Using Various Forms of Isotherms in Soils of Adıyaman Çamgazi Plain

Abstract: Samples from 8 widespread soil series from Adıyaman Çamgazi Plain were equilibrated at a constant temperature with 16 different solutions containing 0 to 50 µg/ml phosphorus in batch-type experiments. The phosphorus concentrations of the equilibrium solutions and the amounts of phosphorus adsorbed by the soils at these concentrations were determined. These phosphorus-adsorption data were evaluated statistically for their suitability for adsorption isotherms in various concentration ranges.

Giriş

Fosfor topraklarda katı faz tarafından çok güçlü bir şekilde tutulmaktadır. Bu nedenle, çözelti fazındaki konsantrasyonu oldukça düşük düzeydedir. Topraklara gübre olarak verilen fosforun büyük bir bölümü katı faz tarafından çekilmekte, bunun sonucunda da gübrenin bitkiye yararlılığı önemli ölçüde azalmaktadır. Fosforun katı fazda tutulması ile ilgili çalışmalar yapan araştırmacıların çoğu, bu olaya gerçek yüzey tutulması veya çökme ayrımı gözetmeksizin "fosfor adsorpsiyonu" ismini vermektedirler.

Toprakların fosfor adsorpsiyon özellikleri gerçekte katı, sıvı ve gazlar için geliştirilmiş olan çeşitli adsorpsiyon izotermleri ile formüle edilmeye çalışılmaktadır. Adsorpsiyon izotermleri ile belirlenen bu özellikler, toprakların fosfor adsorpsiyon kapasiteleri, fosforun tutulma enerjileri gibi konularda önemli bilgiler vermektedir.

Fosfor adsorpsiyon çalışmalarında yaygın olarak kullanılan Langmuir adsorpsiyon izotermi (1), topraklara

ancak belirli çözelti fosfor konsantrasyonu aralığında uygulanabilmektedir (2, 3). Langmuir adsorpsiyon izoterminin fosfor adsorpsiyon çalışmalarına uygulanmasında, toprakların adsorbe ettikleri fosfor miktarları (x/m) ve denge çözeltilerinin fosfor konsantrasyonları (C) kullanılmaktadır. Bu çalışmalarda, analiz yoluyla bulunan C ve hesaplama yoluyla bulunan C/(x/m) değerlerine regresyon analizi uygulanmaktadır. Regresyon analizlerinin sonucunda ise Langmuir adsorpsiyon izoterminin aşağıda verilen doğrusallaştırılmış denklemi belirlenmektedir.

$$C/(x/m) = 1/kb + C/b$$

Bu denklemde; daha önce belirtilmeyen terimlerden b, adsorpsiyon maksimumu, k ise adsorpsiyon enerji katsayısıdır. Bu katsayılar doğrusallaştırılmış Langmuir denkleminin sırasıyla 1/b (eğim) ve 1/kb (kayma) değerlerinden hesaplanmaktadır.

Fosfor adsorpsiyon çalışmalarında kullanılan diğer bir izoterm de Freundlich adsorpsiyon izotermidir. Bu izotermin doğrusallaştırılmış şekli aşağıdaki gibidir (4).

$$\text{Log}(x/m) = \text{Log}(K) + N \text{Log}(C)$$

Burada; x/m Langmuir izotermine olduğu gibi örnekler tarafından adsorbe edilen fosfor miktarı ($\mu\text{g/g}$), C ise denge çözeltisinin fosfor konsantrasyonu ($\mu\text{g/ml}$)'dur. Yine, K adsorpsiyon kapasitesi ile, N ise adsorpsiyon intensitesi ile ilgili katsayıdır.

Bu çalışmanın amacı, Adıyaman Çamgazi ovasında yaygın olan 8 toprak serisinde, adsorbe edilen fosfor miktarlarına (x/m) yüzey fosforu (Olsen fosforu)'nun eklendiği veya eklenmediği durumlarda, Langmuir ve Freundlich adsorpsiyon izotermelerinin uygulanabilme olanaklarını araştırmak olmuştur.

Materyal ve Metot

Bu araştırmada Adıyaman Çamgazi ovasında yaygın olan Büyükböyü, Çamgazi, Doyran, Ekin, Karaburç, Kayalı, Kepir ve Mıdır serilerinin yüzey horizonlarından alınan toprak örnekleri kullanılmıştır. Ayrıca, bu örneklerle uygulanmak üzere 0.01 M CaCl_2 içerisinde 0, 0.2, 0.4, 0.8, 1, 2, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 30 ve 50 $\mu\text{g/ml}$ fosfor içeren ve orijinal çözeltiler olarak isimlendirilen 16 farklı çözelti hazırlanmıştır. Anılan bu çözeltilerin hazırlanmasında KH_2PO_4 kullanılmıştır.

Denemeler için hazırlık işlemlerinden geçirilen topraklardan üçer yinelemeli olarak tartılan 1 g'lık hava kuru örnekler, 150 ml'lik erlenmayerler içerisinde, orijinal çözeltilerden 40 ml uygulanmış ve sabit sıcaklıkta (25 °C) 24 saat süreyle atmosfere açık olarak çalkalanmışlardır. Sonra, denge koşulları olduğu varsayılan toprak-çözelti karışımı süspansiyonlardan sıvı fazlar (denge çözeltileri) santrifüjle ayrılmıştır. Daha sonra, orijinal ve denge çözeltilerinin fosfor içerikleri kolorimetrik yöntemle (5) belirlenmiştir. Diğer yandan, hava kuru koşullarda 1 g olarak tartılan örneklerin, hesaplamalarda kullanılmak amacıyla, fırın kuru ağırlıkları belirlenmiştir.

Her bir denge çözeltisi fosfor konsantrasyonunda, toprakların adsorbe ettikleri fosfor miktarları (x/m), orijinal ve denge çözeltilerinin fosfor konsantrasyonları arasındaki farktan hesaplanmıştır. Hesaplamalarda, toprak örneklerinin fırın kuru ağırlıkları esas alınmıştır.

Deneyel yollarla C ve x/m değerlerinin saptanmasından sonra, toprakların adsorpsiyon karakteristikleri Langmuir ve Freundlich adsorpsiyon izotermelerine göre ayrı ayrı belirlenmiştir. Deneyel

verilerin Langmuir adsorpsiyon izotermine göre değerlendirilmesinde, C ve $C/(x/m)$ değerleri arasında doğrusal ilişkilerin bulunduğu konsantrasyon aralıkları, önce grafikler yardımı ile araştırılmış ve biri düşük diğeri yüksek iki konsantrasyon aralığında olan iki bölge belirlenmiştir. Sonra, her iki bölgedeki C ve $C/(x/m)$ değerlerine regresyon analizi uygulanmış ve iki farklı konsantrasyon aralığında (2 bölgesi) Langmuir denklemleri belirlenmiştir. Daha sonra, özellikle düşük fosfor konsantrasyonu aralığında x/m değerlerine yüzey fosforu olarak Olsen yöntemine göre belirlenen yarıyıllı fosfor konsantrasyonları (S) eklenerek düzeltme yapılmış ($x/m + S = A$) (6) ve C ile C/A değerleri arasında aynı işlemler tekrarlanarak Langmuir adsorpsiyon izotermine uyum araştırılmıştır. Yine, deneyel verilerin Freundlich adsorpsiyon izotermine uyumu önce $\log C$ ile $\log x/m$ ve $\log C$ ile $\log A$ değerleri arasında çizilen grafikler üzerinde araştırılmış, sonra anılan değerlere regresyon analizleri uygulanarak Freundlich denklemleri belirlenmiştir.

Ayrıca, toprakların pH, kireç, organik madde, yüzey fosforu, bünye ve KDK gibi bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri yaygın olarak kullanılan yöntemlere göre belirlenmiştir (Tablo 1).

Araştırma Bulguları ve Tartışma

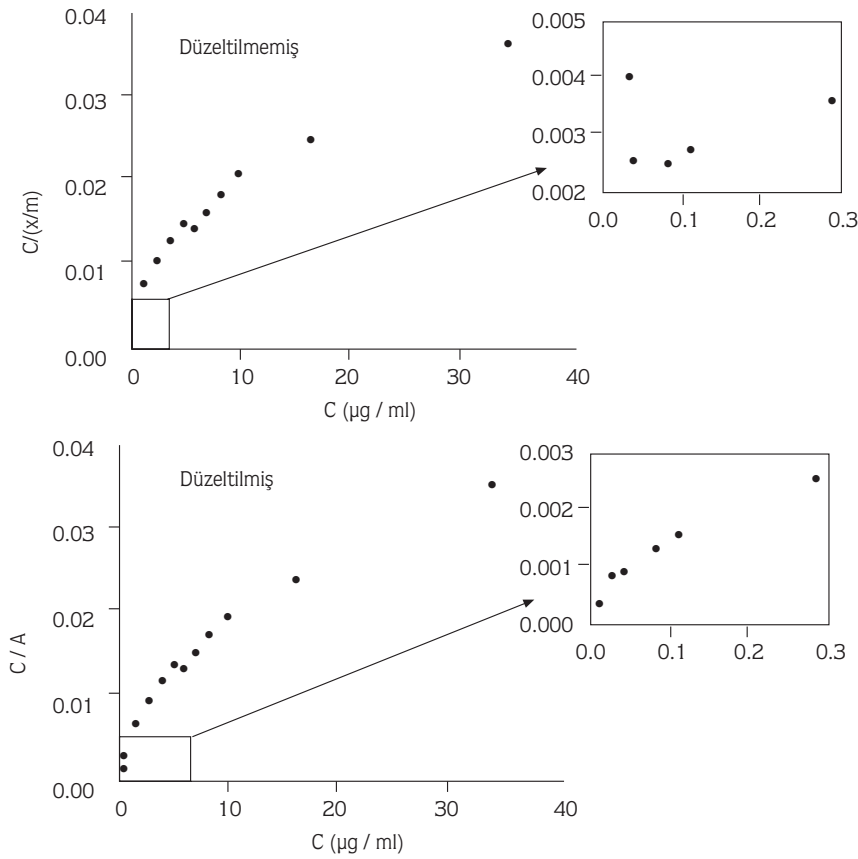
Çalkalama tipi denemelerle elde edilen C değerleri ile $C/(x/m)$ ve C/A ve ayrıca C ile x/m ve A değerleri arasındaki ilişkiler ve anılan ilişkilerin Langmuir ve Freundlich izotermelerine göre değerlendirilmesi sonucunda elde edilen bulgular aşağıda verilmiştir.

Langmuir Adsorpsiyon İzotermi

Langmuir adsorpsiyon izotermine doğrusallaştırılmış şeklini uygulamak amacıyla C ile $C/(x/m)$ değerleri arasında oluşturulan bir grafik Şekil 1'de verilmiştir. Ekin serisi için verilen bu örnek grafikte görüldüğü gibi, x/m değerlerine yüzey fosforunun eklenmediği durumlardaki düşük P konsantrasyon aralığında ($C < 0.1 \mu\text{g/ml}$) C 'nin artması ile $C/(x/m)$ önce azalmakta ve sonra artmaya başlamaktadır. Bu durum, azalan konsantrasyon aralığında Langmuir izotermine uyum olasılığını ortadan kaldırmaktadır. Ancak, x/m değerlerine Olsen fosforu eklendiğinde C ile C/A arasındaki ilişki daha doğrusal hale gelmektedir (Şekil 1). Benzer durum, grafikleri verilmeyen diğer toprak serilerinde de görülmektedir.

Tablo 1. Araştırma konusu toprakların bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Seri	Hor.	Derinlik (cm)	pH	KDK me/100g	Kireç (%)	Org.Mad. (%)	Yüzey	Kum	Tane İriliği Dağ.%	
			1:40 CaCl ₂				P µg/g		Silt	Kil
Büyükboyalı	Ap	0-13	7.4	55.7	1.8	1.07	13.2	11.7	24.3	64.0
Çamgazi	Ap	0-15	7.0	31.3	0.4	0.86	27.2	29.2	27.2	43.6
Doyran	Ap	0-18	7.2	50.0	0.6	0.90	11.6	15.1	20.4	64.5
Ekin	Ap	0-21	7.3	54.3	0.7	1.04	26.4	11.1	20.2	68.7
Karaburç	Ap	0-22	7.4	55.2	8.0	0.94	14.0	15.8	21.3	62.9
Kayalı	Ap	0-18	7.8	50.5	15.8	1.41	27.2	23.9	31.0	45.1
Kepir	Ap	0-11	7.5	48.1	22.7	0.89	6.0	22.4	24.8	52.8
Mıncır	Ap	0-10	7.2	62.5	0.4	0.92	14.4	9.9	15.8	77.3



Şekil 1. Ekin serisinde C ile C/x/m ve C/A değerleri arasındaki ilişkiler.

Tüm toprak serilerinde, C ile C/x/m ve C/A arasında çizilen grafiklerin incelenmesi sonucunda, bir doğru üzerinde bulunma olasılıkları yüksek noktaların biri düşük diğeri ise yüksek konsantrasyon aralıklarında iki grup oluşturdukları görülmüştür (I. ve II. bölge). İki grup

altında toplanan noktalara uygulanan regresyon analizleri ile elde edilen Langmuir denklemlerine ilişkin veriler; kayma ve eğim değerleri, bunlardan hesaplanan adsorpsiyon maksimumları (b) ve adsorpsiyon enerji katsayıları (k) olarak Tablo 2 ve 3 de verilmiştir.

Tablo 2. Düzeltilmemiş x/m değerlerine uygulanan regresyon analizi.

Seri	Bölge	Kayma (10 ³)	Eğim (10 ³)	b (μg/g)	k (ml/μg)	r ²	n	Kons. Aralığı (μg/ml)
B.boyalı	I	+	+	+	+	+	4	0.011- 0.123
	II	5.280	2.12	471.70	0.40	0.950**	7	0.323- 7.357
amgazi	I	+	+	+	+	+	4	0.021- 0.128
	II	3.770	3.82	261.78	1.01	0.995**	8	0.312-11.800
Doyran	I	1.030	14.50	68.96	14.08	0.981**	4	0.010- 0.100
	II	4.430	2.21	452.49	0.50	0.980**	10	0.213-20.000
Ekin	I	-	-	-	-	-	-	0.030- 0.110
	II	5.220	1.72	581.40	0.33	0.954**	9	0.287- 9.500
Karabur	I	-	-	-	-	-	-	0.053- 0.200
	II	5.190	3.04	328.95	0.59	0.994**	3	0.477- 3.067
Kayalı	I	-	-	-	-	-	-	0.054- 0.338
	II	6.030	1.93	518.13	0.32	0.985**	4	1.670- 4.873
Kepir	I	-	-	-	-	-	-	0.002- 0.427
	II	10.010	2.13	469.48	0.21	0.963**	8	2.320-11.625
Micır	I	+	+	+	+	+	4	0.022- 0.146
	II	5.070	2.07	483.09	0.41	0.981**	9	0.300-10.600

+ veya - : Langmuir izotermine uyum görülememiştir (+: istatistiksel yönden önemli değil; - : C ile C/x/m arasında negatif ilişki).

Yüzey fosforunun x/m değerlerine eklenmediği durumlarda (düzeltilmemiş), C ve C/(x/m) değerlerine uygulanan regresyon analizleri sonucunda, serilerin hemen tamamında düşük konsantrasyon aralığında (I. Bölge) Langmuir izotermine uyum görülmemiştir (Tablo 2). Bu durum, bu bölgede C değerlerinin artmasıyla C/(x/m) değerlerinin önce azalıp sonra artmaya başlamasından kaynaklanmıştır. Bunun da nedeni, büyük bir olasılıkla, çok düşük denge konsantrasyonlarında hesaplanan x/m değerlerinin gerçekte olması gereken değerlerden daha küçük çıkmasıdır. Buna karşılık, bütün serilerin II. bölgelerinde Langmuir denklemine uyum görülmüştür. Adsorbe edilen fosfor miktarlarına (x/m) yüzey fosforunun (S) eklenmesiyle belirlenen ilişkilerde ise, belki de düşük konsantrasyonlarda gerçekte adsorbe edilmiş olması gereken fosfor değerlerine ulaşıldığından, tüm serilerde her iki bölgede de Langmuir izotermine uyum görülmüştür (Tablo 3).

Yüksek konsantrasyon aralığında (II. bölge) yüzey fosforunun (S) x/m değerlerine eklenmesi veya eklenmemesi verilerin Langmuir izotermine uyumunu etkilememiştir. Her iki durumda da tüm serilerde önemli

(p < 0.01) ilişkiler elde edilmiştir (Tablo 2 ve 3). Burada x/m değerlerinin düzeltilmesinin b ve k değerlerini etkilemediği ve II. bölge için bu izotermilerin benzer oldukları görülmektedir.

Düzeltilmiş x/m değerlerinin kullanılması ile belirlenen b değerleri I. bölgede II. bölgeden oldukça düşüktür. Bu durum, toprakların I. bölgedeki fosfor adsorpsiyon kapasitelerinin II. bölgeden oldukça düşük olduğunu belirtmektedir. Diğer yandan, k değerlerinde tam tersi bir durum görülmektedir. Bu durum da, I. bölgede adsorbe edilen fosforun II. bölgede adsorbe edilenlerden daha güçlü bir şekilde tutulduğunu göstermektedir (7).

Freundlich Adsorpsiyon İzotermi

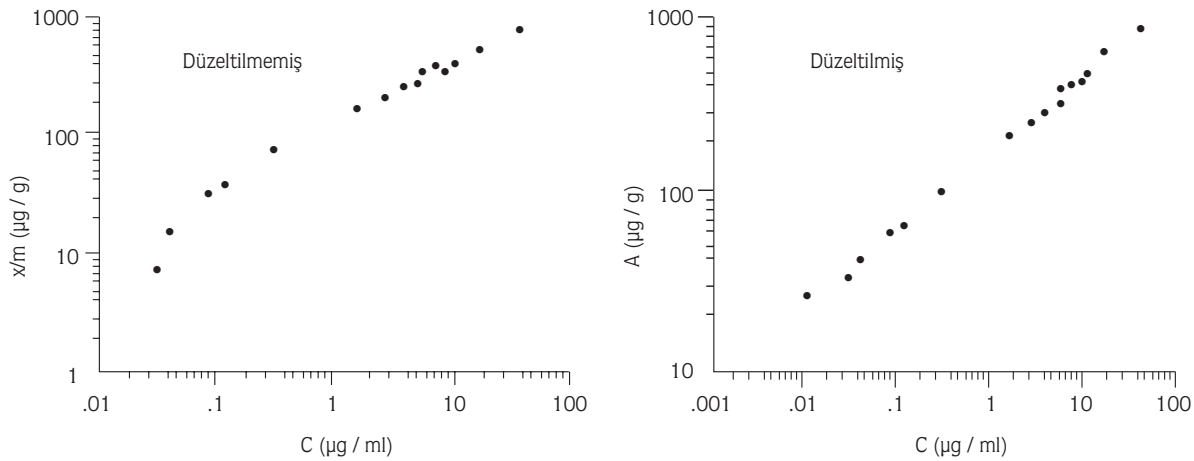
Freundlich adsorpsiyon izotermine uygulanabilirliğini araştırmak amacıyla log (C) ve log (x/m) değerleri arasında oluşturulan örnek bir grafik Şekil 2'de verilmiştir. Örnek grafikte olduğu gibi, diğer tüm serilere ait grafiklerde de C ile x/m ve A değerlerine ait hemen tüm noktaların bir doğru üzerinde bulunma olasılıklarının oldukça yüksek olduğu görülmüştür.

Tablo 3. Düzeltilmiş x/m değerlerine (A) uygulanan regresyon analizi.

Seri	Bölge	Kayma (10 ³)	Eğim (10 ³)	b (µg/g)	k (ml/µg)	r ²	n	Kons. Aralığı (µg/ml)
B.boyalı	I	0.317	17.60	56.82	55.52	0.931**	5	0.001- 0.123
	II	4.680	2.11	473.92	0.45	0.949**	7	0.323- 7.357
Çamgazi	I	0.315	13.50	74.07	42.86	0.985**	5	0.012- 0.128
	II	3.430	3.33	300.30	0.97	0.933**	8	0.312-11.800
Doyran	I	0.227	17.80	56.18	78.41	0.958**	5	0.000- 0.100
	II	4.170	2.15	465.12	0.52	0.982**	10	0.213-20.000
Ekin	I	0.412	11.70	85.47	28.40	0.956**	5	0.010- 0.110
	II	4.270	1.70	588.23	0.40	0.957**	9	0.287- 9.500
Karaburç	I	1.910	11.10	90.09	5.81	0.968**	5	0.027- 0.200
	II	4.150	3.09	323.62	0.74	0.994**	3	0.477- 3.067
Kayalı	I	0.777	8.34	119.90	10.73	0.993**	6	0.014- 0.338
	II	4.910	1.90	526.32	0.39	0.988**	4	1.670- 4.873
Kepir	I	0.618	11.90	84.03	19.26	0.941**	6	0.002- 0.427
	II	9.620	2.12	471.70	0.22	0.966**	8	2.320-11.625
Mıdır	I	0.529	15.80	63.29	29.87	0.972**	5	0.007- 0.146
	II	4.450	2.09	478.47	0.47	0.982**	9	0.300-10.600

Topraklara ait C ile x/m ve A değerlerinin Freundlich adsorpsiyon izoterminde göre değerlendirilmesi sonucunda elde edilen veriler sırasıyla Tablo 4 ve 5'de sunulmuştur. Burada, Freundlich adsorpsiyon izoterminin Langmuirden daha geniş bir konsantrasyon aralığındaki (daha fazla sayıda n) verilere uygulanabildiği görülmektedir.

Bütün toprak serilerinde düzeltilmiş Freundlich denklemlerinin K değerleri, çok farklı olmamakla birlikte, düzeltilmemişlerinkinden büyük çıkmıştır. Buna karşılık, N değerlerinde ise tam tersi bir durum görülmektedir (Tablo 4 ve 5). Her iki durumda da izoterme uyum istatistiksel açıdan 0.01 düzeyinde önemli bulunmuştur. Ayrıca, düzeltilmiş verilerin kullanılması r² değerlerini arttırmıştır.



Şekil 2. Ekin serisinde Log (C) ile Log (x/m) ve Log (A) değerleri arasındaki ilişkiler.

Tablo 4. Düzeltilmemiş x/m değerlerinin kullanılması sonucu belirlenen Freundlich denklemlerine ($x/m = K.C^N$) ait K ve N değerleri ile determinasyon katsayıları (r^2).

Seri	K	N	r^2	n	Kons. Aralığı ($\mu\text{g/ml}$)
B.boyalı	124.64	0.589	0.995**	15	0.011-31.733
amgazi	86.49	0.479	0.959**	15	0.021-42.000
Doyran	126.42	0.511	0.978**	15	0.010-36.500
Ekin	124.67	0.619	0.974**	15	0.030-33.000
Karaburç	102.61	0.782	0.987**	15	0.053-28.000
Kayalı	123.91	0.737	0.986**	15	0.036-23.533
Kepir	89.79	0.649	0.863**	16	0.002-32.733
Mıdır	113.54	0.583	0.983**	15	0.022-34.183

Tablo 5. Düzeltilmiş x/m değerlerinin (A) kullanılması sonucu belirlenen Freundlich denklemlerine ($x/m = K.C^N$) ait K ve N değerleri ile determinasyon katsayıları (r^2).

Seri	K	N	r^2	n	Kons. Aralığı ($\mu\text{g/ml}$)
B.boyalı	163.40	0.441	0.975**	16	0.001-31.733
amgazi	131.19	0.335	0.990**	16	0.012-42.000
Doyran	152.22	0.430	0.988**	16	0.000-36.500
Ekin	181.78	0.448	0.998**	16	0.010-33.000
Karaburç	135.82	0.644	0.996**	16	0.027-28.000
Kayalı	188.62	0.521	0.980**	16	0.014-23.533
Kepir	124.40	0.452	0.988**	16	0.002-32.733
Mıdır	145.34	0.475	0.996**	16	0.007-34.183

Sonuçlar

Adsorpsiyon izotermelerinin bir amacı da, topraklarda fosforun davranışlarını incelemek için, çok geniş bir konsantrasyon aralığında yapılan adsorpsiyon denemeleriyle elde edilen fazla sayıdaki verilerin uygun ve kullanılabilir bir biçimde özetlenmesidir. Bu izotermelerden yola çıkarak hesaplanan bazı katsayıların (b, k, K, N vs.) kullanılabilirliği tartışma konusu olmakla birlikte bunların en azından seriler arası kıyaslamalarda kullanılabilecekleri kabul edilmektedir.

İzotermelerin uygulanabilirliklerinin araştırıldığı bu çalışmada, Freundlich izotermine ele alınan toprak serilerinde verileri geniş konsantrasyon aralığında tek bir denklemle, matematiksel bir biçimde özetleme, daha

kullanışlı olduğu sonucuna varılmaktadır. Langmuir izotermi ile ilgili olarak ise, denemeler öncesinde topraklarda bulunan yüzey fosforunun (S) dikkate alınması durumunda, bu izotermine düşük konsantrasyon aralığında daha kullanışlı olduğu ileri sürülebilir. Gerçek adsorpsiyonun yanı sıra birtakım ikincil çökelme olaylarının bulunması durumunda, teorik olarak mümkün olmasa bile, bazı deneysel verilerin Langmuir izotermine uyduğu ve bu izotermine adsorpsiyon mekanizmasının doğasını irdeleyen çalışmalarda kullanılmasının doğru olmayacağı bildirilmektedir (8). Bu nedenle, anılan izotermine fosfor denge konsantrasyonunun düşük ($C < 0.5 \mu\text{g/ml}$), dolayısıyla çeşitli kalsiyum fosfat minerallerinin çökelme olasılığının daha az olduğu bir konsantrasyon aralığında kullanılması önerilebilir.

Kaynaklar

1. Olsen, S.R., Watanabe, F.S., A Method to Determine a Phosphorus Adsorption Maximum for Soils as Measured by the Langmuir Isotherm, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 21:144-149, 1957.
2. Derici, M.R., Kaya, Z., Phosphorus Adsorption Characteristics of the Soils of the Harran Plain. *Soils of the Harran Plain. TÜBİTAK Tarım ve Ormancılık Araştırma Grubu, Proje No: TOAG-534, Ankara, S:31-38, 1991.*
3. Gupta, R.K., Singh, M., Shukla, U.C., Characterisation of Added and Soil Phosphorus in Some Soils of Haryana, *J. Indian Soc. Soil Sci.*, 25:134-140, 1977.
4. Sayın, M., Mermut, A.R., Tiessen, H., Phosphate Sorption-Desorption Characteristics by Magnetically Separated Soil Fractions, *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 54:1298-1304, 1990.
5. Murphy, J., Riley, J.P., A Modified Single Solution Method for the Determination of Phosphate in Natural Waters, *Anal. Chem. Acta.*, 27: 31-36, 1962.
6. Holford, I.C.R., Adsorbed Phosphate in Soils and Sediments. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 44:441-442, 1980.
7. Syers, J.K., Bronman, M.G., Smillie, G.W., Corey, R.B., Phosphate Sorption by Soils Evaluated by Langmuir Adsorption Equation, *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 37:358- 366, 1973.
8. Veith, J.A., Sposito, G., On the Use of the Langmuir Equation in the Interpretation of Adsorption Phenomena, *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 41:697-702, 1977.