

KİREÇLİ TOPRAKLARDA FOSFOR DİNAMİĞİNİN BELİRLENMESİ

Kursat KORKMAZ^{1*}; Hayriye İBRİKÇİ²

¹ Ordu Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bölümü, Ordu
² Çukurova Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bölümü, Adana
*e-mail: korkmaz60@gmail.com

Geliş Tarihi: 15.05.2009

Kabul Tarihi: 12.01.2010

ÖZET: Fosfor (P) bitki gelişimi için mutlak gerekli olan elementlerinden birisidir. Ülkemiz ve özellikle de Güney Doğu Anadolu bölgesi (GAP) toprakları, sürekli olarak fosfor ilave edilmesine rağmen, yüksek pH, kil ve kireç içerikleri nedeniyle fosfor düzeyi ürün gelişimi açısından değerlendirildiğinde kritik seviyededir. Topraklarda fosforun dinamiğinin anlaşılması oldukça zor ve karmaşıktır. Bu çalışmada Türkiye’de tarım potansiyeli olarak önemli bir yere sahip olan Güney Doğu Anadolu bölgesine ait yaygın olarak tarım yapılan yüksek kil ve kireç içeriğine sahip 3 toprak serisine ait topraklarda P fraksiyonları, toprakların adsorpsiyon dinamikleri ve Langmuir izotermi ile çalışılmıştır. Yapılan analizlerin sonuçlarına göre bölge topraklarında toplam P’un büyük bir çoğunluğunu Ca-P oluşturmuş sırasıyla CDB-P>CB-P>Al-P+Fe-P şeklinde diziliş göstermiştir ve adsorpsiyon maksimumu olan b değerleri 263-400 $\mu\text{g g}^{-1}$ arasında değişirken, adsorpsiyon enerji katsayısı olan k, 0.70 ile 0.76 $\text{ml } \mu\text{g}^{-1}$ arasında değişiklik göstermiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde, özellikle kurak ve yarı kurak iklim kuşağına sahip alanlardaki topraklarda P adsorpsiyonu ile toprakların fiziksel ve kimyasal karakteristikleri arasındaki ilişkinin oldukça karmaşık ve çok yönlü olması sebebiyle istatistiksel olarak önemli ilişkiler bulunmasa da toprakların kireç, kil tipi ve Fe oksit içeriklerinin P adsorpsiyonunu etkileyen önemli faktörler olduğu saptanmıştır. **Anahtar Sözcükler:** Fosfor fraksiyonları, P adsorpsiyonu, P desorpsiyonu, Langmuir izotermi,

DETERMINATION OF PHOSPHORUS DYNAMICS IN CALCAREOUS SOILS

ABSTRACT: Phosphorus (P) is an essential macronutrient for plant growth and development. Although phosphorus is frequently added the soils in our country and specially the soils in the South-East Anatolian Region (GAP) are at a critical level for normal plant growth due to including high amount of clay, lime and pH. The dynamic of phosphorus in soils is complicated and difficult to explain. In this study the P fractions and the adsorption dynamics of three different soil series, taken from the South-East Anatolian region which has an important place regarding its agricultural potential in Turkey, and where agriculture were performed in broad sense and where the soils contains high amount of lime and clay, using Langmuir isotherms. According to the results of the present study; most of the total P was composed of Ca-P and followed by CDB-P>CB-P>Al-P+Fe-P and b values, adsorption maximums, were among 263-400 $\mu\text{g g}^{-1}$, adsorption energy coefficient (k) varied between 0.70 and 0.76 $\text{ml } \mu\text{g}^{-1}$. Because of the complexity and versatility of physical and chemical characteristics P adsorption of soil in arid and semi-arid climate, there is no statistically significant relationship however type of clay and amounts of lime and Fe-oxides are important factors affecting phosphorus adsorption

Key Words: P fractions, P adsorption, P desorption, Langmuir isotherms

1. GİRİŞ

Bitkilerin verimliliklerinin artırılmasında yurdumuz toprakları için azottan sonra en çok noksanlığı görülen elementlerden birisi fosfordur. Topraklarda toplam fosfor kapsamı normal, bazen de yüksek düzeyde bulunduğu halde, yarıyıllık fosforun azlığı ve uygulanan fosforun fikse edilmesi nedeniyle, çiftçiler bitki ihtiyacının çok üzerinde fosforu gübre olarak uygulamaktadırlar. Bu aşırı uygulama, ekonomik zararı ve çevre kirliliğini de birlikte getirmektedir. Fosfor ile ilgili diğer bir sorun da rezervlerin giderek azalmasıdır. Ham maddesi tamamen ithal edilerek sağlanan fosfatlı gübrelerin, sadece ülkemizde 2006 yılındaki tüketim miktarı ise 700 milyon ton civarındadır (Anonymous, 2006). Mevcut bulunan tüketim hızıyla yapılan hesaplamalar, önümüzdeki 60-90 yıl içerisinde dünyada yüksek saflıkta bulunan ham fosfat kayası kaynaklarının tükeneceğini göstermektedir (Runge-Metzger, 1995; Vance ve ark., 2003).

Topraklarda fosforun ana kaynağı apatittir. Apatit kompleks bir bileşiktir ve kimyasal olarak

$3[\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2]\text{XCax}_2$, yapısında olup, X yerine F⁻, Cl⁻, OH⁻, veya CO₃⁻² iyonları gelebilmektedir. Toprakların toplam fosfor içeriği ana materyalin yapısına ve iklim koşullarına göre değişmekle birlikte 100-3000 mg kg^{-1} arasında değişmektedir (Frossard, ve ark., 2000). Topraklarda fosfor, bitkilere yarıyıllık fosfor içeriği açısından değerlendirildiğinde 8-25 mg kg^{-1} (Alpaslan ve ark., 1998), Torrent ve Delgado (2001) ise 10-15 mg kg^{-1} değerleri arasında bulunduğu fosforun bitki gelişimi için yeterli olduğu kabul edilmesine rağmen fosfor, sıklıkla topraklarda bitki gelişimi için yetersiz konsantrasyonlarda bulunmaktadır. Fosforun tarım topraklarındaki miktarının genellikle az olması, ayrıca topraklarda çok değişik şekillerde reaksiyona girerek büyük bir kısmının topraklarda demir ve alüminyum oksitlerce ve kalsiyum fosfatlarca bitkilerin yararlanamayacağı formlarda tutulması nedeniyle, ihtiyaç duyulan önemli bir makro besin elementidir (Bertrand, ve ark. 1999; Alam ve Ladha, 2004).

Ülkemiz içinde bulunduğu iklim kuşağı, jeolojik yapısı ve coğrafi konumundan dolayı, topraklar yüksek kil, kireç, yüksek pH ve düşük organik madde içeriklerine sahiptirler (Dinç ve ark., 1988). Bu tür

kimyasal özellikler, topraklarda fosforun bitkilere yararışlılığını önemli ölçüde sınırlamaktadır (Gallet ve ark., 2003; Fransson ve ark., 2003). Diğer bitki besin elementlerinden farklı olarak, uygulanan fosforun büyük bir bölümü toprak tarafından büyük bir güçle tutulmakta ve toprağa uygulanan fosforlu gübrelerin %80'inden fazlası adsorpsiyon ve çökeltme yoluyla veya organik bileşikler oluşturularak bitkilerin alamayacağı forma dönüşmektedir (Holford,1997; Shin ve ark., 2004). Toprakların fosfor adsorpsiyon güçlerinin bilinmesi, fosforlu gübre uygulamaları açısından önemlidir.

Toprağa kolay çözünen bileşikler şeklinde uygulanan fosforun kısa bir süre içerisinde basit ekstraksiyon yöntemleri ile geri alınmaması, toprağın katı fazı tarafından kuvvetle tutulduğunu göstermektedir. Bunun sonucunda da toprak çözeltisinde fosfor konsantrasyonu $1 \mu\text{g ml}^{-1}$ üzerine pek çıkmamaktadır. Fosforun sıvı fazdan hızla katı faza çekilmesi bitkilere yararışlılığını azaltmakta ve fosfor gübrelemesini gerekli kılmaktadır. Bu olayın kinetiği üzerinde çalışarak olayla ilgili bazı hız ve düzey parametrelerini saptamaya çalışan araştırmacılar "fosfor adsorpsiyonu" ifadesini benimsemişlerdir (Dinç ve ark., 1988).

Fosforun; gübreleme yönetimi ve su kalitesi açısından değerlendirildiğinde topraklar tarafından adsorpsiyon ve desorpsiyonunun iyi anlaşılması gerekmektedir. Topraklarda fosfor adsorpsiyon özellikleri gerçekte katı, sıvı ve gazlar için geliştirilmiş olan çeşitli adsorpsiyon izotermi ile formüle edilmeye çalışılmaktadır. Adsorpsiyon izotermilerinin bir amacı da, topraklarda fosforun davranışını incelemek için, çok geniş bir konsantrasyon aralığında yapılan adsorpsiyon denemeleriyle elde edilen fazla sayıdaki verilerin uygun ve kullanılır biçimde özetlenmesidir (Hinrich ve ark., 1985; Ağca ve Derici, 1999). Fosfor adsorpsiyon çalışmalarında yaygın olarak kullanılan Langmuir izotermi uygun olduğu birçok araştırmacı tarafından bildirilmiştir (Olsen ve Watanabe 1957; Derici ve Ağca 1999;Torrent ve Delgao, 2001; Schulz ve Herzog, 2004).

Ryan ve ark., (1984) yaptıkları araştırmada, topraklarda P adsorpsiyonunda toplam kirecin bir etkisinin olmadığını, özellikle spesifik yüzeylerde bağlı bulunan reaktif kirecin etkili olduğunu ve topraklarda Fe-oksitlerce fosforun adsorbe olduğunu bildirmişlerdir. Fox ve Kamprath (1970) yaptıkları araştırmada özellikle kireçli topraklarda pH'nın önemli bir etkisinin olmasının yanı sıra toprakların kil içeriklerinin ve kil yüzeyinde bağlı bulunan Fe oksit bileşiklerinin fosfor adsorpsiyonunda önemli rol oynadıklarını belirtmiştir. Bu nedenlerden dolayı fosforun banda uygulama yöntemi ile toprakla temas yüzeyini azaltarak topraklarda fosforun tutulmasını engelleyerek, bitkiler için daha etkin bir kullanımının sağlanabileceği ifade edilmiştir (Raun ve Barreto, 1995). Fosforun özellikle potansiyel olarak H^+ ve OH^- yüklü değişebilir yüzeylere sahip Fe-Al oksitlerce

adsorpsiyonu yapılabildiği gibi, Ca^{++} veya CO_3 iyonlarının oluşturduğu değişebilir yüzeylerce de adsorpsiyonu gerçekleştirebilmektedir. Kristalize ve kristalize olmayan Fe oksitler tarafından P'un adsorpsiyonu oransal olarak onların miktarına ve spesifik yüzey alanlarına bağlıdır. Kristalize olmayan Fe oksitlerin yüzey alanları $400 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ve kristalize olanları ise yaklaşık $100 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ civarındadır (Matar ve ark., 1992). Bununla birlikte özellikle fosfor adsorpsiyonunda Kaolinit tipi kil mineralleri (1:1) birim yüzey alanında, 2:1 tipi kil minerallerine göre daha yüksek oranda fosfor adsorpsiyon kapasitesine sahiptir (Matar ve ark., 1992; Güzel ve ark., 2002).

Bu çalışmada kireç içeriği yüksek olan toprakların fosfor fraksiyonlarını belirleyerek topraklarda fosforun dinamiğinin belirlenmesi; adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermilerinin yardımıyla laboratuvar çalışmaları ile ve Langmuir adsorpsiyon izotermi kullanılarak ortaya konulmuş, özellikle düşük denge konsantrasyon aralığında belirlenmiş fosforun topraklardaki karakteristiği saptanmaya çalışılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

Araştırmada kullanılan topraklar GAP bölgesinde yoğun olarak tarım yapılan toprak serilerinden örneklemeler yapılarak, yararışlı fosfor içerikleri düşük olan toprak serilerinden İkizce, Harran I ve Çekçek toprak serileri kullanılarak yürütülmüştür.

Denemelere ait toprak örneklerinde fosfor adsorpsiyon çalışmalarında, 2 mm'lik elekten geçirilmiş hava kurusu toprak örnekleri 2 g tartılarak, toprak örnekleri üzerine 2.5, 5, 10, 20, 30, 40 mg kg^{-1} P içeren 40 ml 0.01 M CaCl_2 çözeltisi ilave edilmiş ve 18 saat çalkalandıktan sonra 3000 devir/dakika 10 dakika santrifuj edilerek toprak örneklerindeki sıvı kısım mavi band filitre kağıdından süzülmüş ve ekstrakt çıkarılmıştır.

Adsorpsiyon analizinden geri kalan topraklar oda sıcaklığında (25°C) saklanarak iyice kurutulduktan sonra desorpsiyon analizi için toprak örnekleri üzerine 40 ml 0.01 M CaCl_2 çözeltisi ilave edilmiş ve tekrar 18 saat çalkalandıktan sonra topraklardan desorbe olan P miktarını belirlemek için örnekler tekrar 3000 devir/dakika'da 10 dakika santrifuj edilmiş, toprak örneklerindeki sıvı kısım mavi band filitre kağıdından süzülerek ekstrakt çıkarılmıştır (Bakheit Said ve Dekarmanji, 1993). Ekstrakt çözeltileri askorbik asit ve çok düşük konsantrasyonda antimonil içeren asitlendirilmiş tek bir amonyum molibdat çözeltisi kullanılması ile mavi renk esasına göre çözeltideki P konsantrasyonları belirlenmiştir (Murphy ve Riley, 1962; Watanabe ve Olsen, 1965).

Fosfor adsorpsiyon çalışmalarında yaygın olarak kullanılan Langmuir izotermi (Derici ve ark., 1995; Derici ve Ağca 1999), toprakların adsorbe ettikleri fosfor miktarını "x/m" ve denge çözeltilerinin fosfor konsantrasyonlarını "C" olarak ifade etmektedir. Bu tür çalışmalarda analiz yoluyla bulunan C ve hesaplama yoluyla bulunan C/(x/m) değerlerine

regrasyon analizi uygulanmaktadır. Regrasyon analizlerinin sonucunda ise Langmuir adsorpsiyon izoterminin aşağıda doğrusallaştırılmış denklemi belirlenmektedir.

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

Bu denklemde; b, adsorpsiyon maksimumu, k ise adsorpsiyon enerji katsayısını ifade etmektedir. Bu katsayılar doğrusallaştırılmış Langmuir denkleminin sırasıyla 1/b (eğim) ve 1/kb (kayma) değerlerinde hesaplanmaktadır (Derici ve ark., 1995; Derici ve Ağca 1999; Ağca ve Derici, 1999; Bilgili ve ark., 2004).

Langmuir adsorpsiyon izoterminde göre analiz verilerinin değerlendirilmesinde, C ve C/(x/m) değerleri arasında doğrusal ilişkilerin bulunduğu konsantrasyon aralıkları araştırılmıştır (Derici ve ark., 1995; Ağca ve Derici, 1999). Araştırmaya konu olan topraklarda P desorpsiyonu ise Bakheit Said ve Dekarmanji, (1993) ile Zhou ve Li (2001) ve tarafından aşağıda belirtilen formüle göre hesaplanmıştır;

$$\% \text{ P-Desorpsiyon} = \frac{\text{Çözeltiliye serbestlenen P miktarı } (\mu\text{g}) \times 100}{\text{Toplam adsorbe olan P } (\mu\text{g})}$$

Topraklarda P fraksiyonları Chang ve Jackson (1957) tarafından geliştirilen ve Syers ve ark. (1972) tarafından değiştirilen yöntemlere göre; toprağın apatit, strengit ve variskit gibi minerallerinde bulunan fosfatı çözündürme güçleri farklı bir seri ekstrakt çözeltilerinde çözündürerek, çözeltiliye geçen fosforun molibdofosforik mavi renk esasına göre belirlenmesiyle saptanmıştır.

1. Al-P+Fe-P: Alüminyum ve demire bağlı oklude olmamış fosfor (0.1 N NaOH + 1M NaCl çözeltisinde çözünebilir fosfor).
2. CB-P : Karbonatlar tarafından tutulmuş fosfor (1 M NaCl + 0.3 M Sitrat + 0.1 M NaHCO₃ çözeltisinde çözünebilir fosfor).
3. CDB-P : Demir oksitler ile hidroksi oksitler içerisinde oklude olmuş fosfor (0.3 M Sitrat + Sodyum dithionit + 0.1 M NaHCO₃ çözeltisinde çözünebilir fosfor).

4. Ca-P : Kalsiyuma bağlı fosfor (1 N HCl çözeltisinde çözünebilir fosfor).

Topraklarda toplam P analizi, perklorik asit (HClO₄) ile yaş yakılan toprak örneğinde çözünemez halde bulunan fosforu çözebilir hale dönüştürdükten sonra vanadamolibdat ile oluşan sarı renk esasına göre kolorimetrik olarak belirlenmiştir (Kacar, 1994)

Deneme topraklarının bünye analizleri, hidrometre yöntemi ile (Bouyocous 1951), toprak reaksiyonu (pH), cam elektrotlu Beckman pH metresi ile doygunluk çamurunda ölçülmüştür (U. S. Salinity Laboratory Staff, 1954).

Total tuz, örneklerin doygunluk çamuru hazırlanarak kondaktivite aleti ile elektriksel geçirgenliğin ölçülmesi suretiyle belirlenmiştir (U.S. Soil Survey Staff, 1951). Kireç, Scheibler kalsimetresi ile belirlenmiştir (Schlichting ve Blume, 1966) . Organik madde Lichterfelder yaş yakma yöntemine (Schlichting ve Blume, 1966) göre yapılmıştır. Yarıyıllı fosfor analizinde kullanılan sodyum bikarbonat çözeltisi ilk defa Olsen ve ark. (1954) tarafından geliştirilmiş ve bu yöntemin değiştirilmiş şekliyle; askorbik asit ve çok düşük konsantrasyonda antimonil içeren asitlendirilmiş tek bir amonyum molibdat çözeltisi kullanılması ile yapılmıştır (Murphy ve Riley, 1962; Watanabe ve Olsen, 1965)

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

3.1. Deneme Topraklarında Fosfor Fraksiyon Çalışmaları

Araştırma konusu olan İkizce, Harran I ve Çekçek serileri topraklarının fosfor fraksiyonlarını gösteren değerler Çizelge 2’de verilmiştir.

Toprakların, genel olarak organik madde içeriği düşük olduğundan dolayı mevcut bulunan organik fosfor miktarı, toplam fosforun % 10’u kadarını oluşturduğu için (Kacar ve Katkat 1997) dikkate alınmamıştır. Araştırma sonuçlarına göre Çizelge 2 incelendiğinde, araştırmaya konu olan toprak serilerinde özellikle toplam-P_{inorg}’un büyük bir bölümünü kalsiyuma bağlı fosfor oluşturmaktadır. İkizce serisinde toplam-P_{inorg}’un % 90’ı, Harran I ve Çekçek serisinde ise % 94’ü kalsiyuma bağlı fosfordan oluşmaktadır.

Çizelge 1. Toprakların Bazı Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Toprak Serisi	Toprak Sınıflandırma	Derinlik (cm)	Tuz (%)	pH	Tekstür (%)			CaCO ₃ (%)	O.M. (%)	Olsen P (mg kg ⁻¹)
					Kum	Silt	Kil			
İkizce	Vertic Torrifluent	0-30	0.078	7.6	6.5	27.2	66.3	12.0	1.1	5.6
		30-60	0.075	7.6	6.0	26.3	67.7	17.0	0.8	2.4
Harran I	Vertic Calciorthid	0-30	0.120	7.7	21.4	33.2	45.4	30.0	0.9	6.7
		30-60	0.112	7.8	20.1	29.4	50.5	30.0	0.8	3.6
Çekçek	Typic Torrifluent	0-30	0.098	7.5	14.4	32.0	53.6	24.0	1.2	6.9
		30-60	0.115	7.6	13.2	29.8	57.0	26.0	0.9	2.8

Çizelge 2. Topraklara Ait Toplam Fosfor ve Toplam Fosforun Fraksiyonları

Toprak Serisi	Al-P+Fe-P	CB-P	CDB-P (mg P kg ⁻¹)	Ca-P	P _{inorg} -Toplam
İkizce	1.5	36.2	55.7	846.2	939.7
Harran I	1.8	38.0	38.5	1234.3	1312.6
Çekçek	1.8	38.0	36.5	1154.3	1230.5

8-25 mg P kg⁻¹ fosfor değerlerinin toprakta bitkiler açısından yeterli olduğu düşünüldüğünde, toplam P_{inorg} değerlerinin gerçekten dikkate değer biçimde, bitki ihtiyacının çok üzerinde (939.7-1230.5 mg P kg⁻¹) olduğu görülmekte, ancak bitkiye yarayışlı fosfor açısından değerlendirildiğinde tüm serilerde yarayışlı fosfor miktarının bitki gereksiniminin çok altında (2.4-6.9 mg P kg⁻¹) olduğu anlaşılmaktadır (Çizelge 1).

Sonuçlara göre Çizelge 2 incelendiğinde, toplam inorganik fosfor içerisinde, fosforun fraksiyonlarının genel olarak Ca-P>CDB-P>CB-P>Al-P+Fe-P şeklinde dağılım gösterdiği belirlenmiştir. Yapılan birçok çalışmada, kireçli topraklarda fosforun özellikle kalsiyum tarafından bağlanarak bitkilere yarayışsız hale geldiği belirtilmektedir (Ryan ve ark., 1985; Bakheit Said ve Dakermanji, 1993; Braschi ve ark., 2003).

Demir oksitler açısından Çizelge 2 incelendiğinde, İkizce serisinde Fe oksitler ve sulu oksitlere tutunmuş olarak bağlı bulunan fosfor bileşiklerinin de toplam P_{inorg}'un, yaklaşık % 6'sını; Harran I ve Çekçek serilerinde ise % 3'ünü oluşturduğu görülmektedir. Bununla birlikte demir oksitlerin özellikle kireçli topraklarda fosforun bağlanarak yarayışsız forma dönüştürülmesinde önemli rolü olduğu birçok araştırmacı tarafından bildirilmektedir (Fox ve Kamprath, 1970; Ryan ve ark., 1985; Matar ve ark., 1992; Bakheit Said ve Dakermanji, 1993; Zhou ve Li, 2001; Shen ve ark., 2003)

3.2. Topraklarda Adsorpsiyon İzoterm Çalışmaları

Araştırma konusu olan İkizce, Harran I ve Çekçek toprak serilerinde yapılan fosfor adsorpsiyonu ile ilgili çalışmada, orjinal fosfor çözeltisi konsantrasyonları C₀, denge çözeltisi fosfor konsantrasyonları C, topraklar tarafından adsorbe edilen fosfor miktarlarını yansıtan x/m ve C/x/m değerleri Çizelge 3'de ve bu değerlere ait serilerin (C/x/m)/C değerlerini ve bu değerlere ait regresyon eğrilerini gösteren grafikler Şekil 1'de, uygulamalardan sonra elde edilen denge çözeltilerinin b, adsorpsiyon maksimumu ve k, adsorpsiyon enerji katsayılarıyla birlikte istatistiksel veriler ise Çizelge 4'de verilmiştir. Deneme topraklarının fosfor adsorpsiyonu ile % adsorpsiyon değerleri de Çizelge 6'da belirtilmiştir. Deneme topraklarının bazı fiziksel, kimyasal özellikleri ile

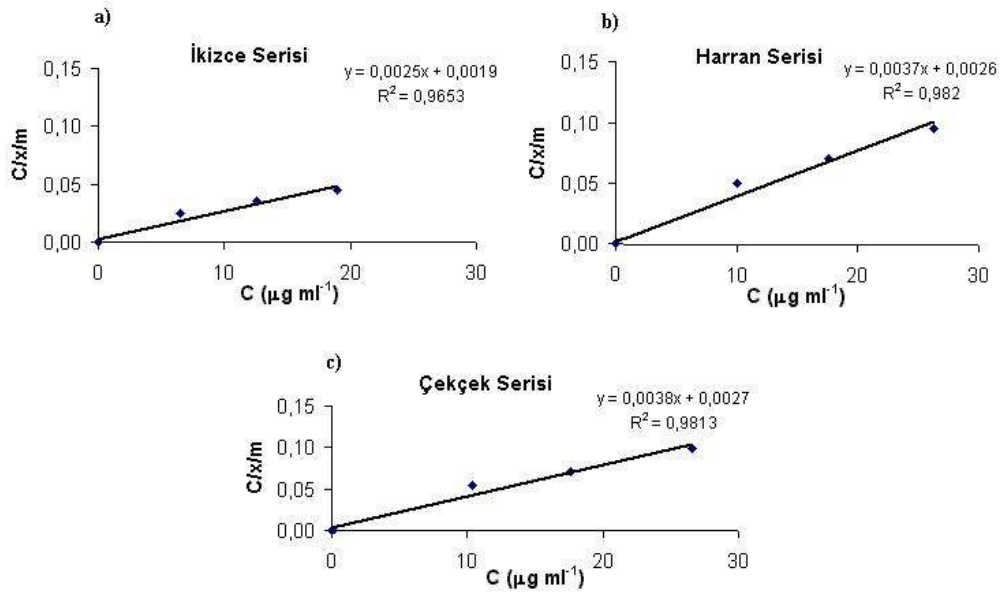
adsorpsiyon parametreleri (b, k) arasındaki korelasyon ve korelasyon katsayıları Çizelge 5'de verilmiştir. Çizelge 3 incelendiğinde, topraklara başlangıçta benzer konsantrasyonlarda orijinal çözeltiler uygulanmasına karşın, topraklar tarafından adsorbe edilen fosfor miktarı ve buna bağlı olarak denge çözelti konsantrasyonları karşılaştırıldığında aralarında önemli farklılıkların olduğu görülmüştür. Toprak örneklerine uygulanan orijinal çözeltilerin fosfor konsantrasyonları aralığı 2.5-40 µg ml⁻¹ olmasına karşılık, denge çözeltilerinde bu aralık seriler arasında farklılıklar göstererek İkizce serisinde 0.026-18.95 µg ml⁻¹, Harran I serisinde 0.026-26.25 µg ml⁻¹ ve Çekçek serisinde 0.029-26.60 µg ml⁻¹ arasında değişiklikler göstermiştir. Başlangıç çözeltisinin fosfor konsantrasyonlarına bağlı olarak denge çözeltisinin fosfor konsantrasyonları da artış göstermiştir. Benzer bulgular değişik araştırmacılar (Dericci ve ark., 1995; Ağca ve Dericci, 1999; Dericci ve Ağca, 1999; Bakheit Said ve Dakermanji, 1993; Zhou ve Li 2001) tarafından da elde edilmiştir.

Deneme topraklarına uygulanan 100 ve 200 µg P uygulamaları, 50 µg P uygulaması ile karşılaştırıldığında C/x/m değerleri önce azalmış ve daha sonra artan fosfor konsantrasyonu ile birlikte artış göstermiştir. Buna benzer sonuçlar Ağca ve Dericci, (1999) tarafından da belirlenmiştir. Bu azalma özellikle düşük konsantrasyonda uygulanan fosforun daha yüksek oranda topraklar tarafından adsorbe olunduğunu ve yapılan fosfor uygulamalarında toprakların önce fosforca doymun düzeye gelerek, adsorpsiyon güçlerinin düşmesi veya adsorpsiyon noktalarının doymunluğa ulaşması ile açıklanmaktadır (Griffin ve Jurinak, 1973).

Araştırma konusu topraklarla ilgili C/(x/m) ve C arasındaki ilişki incelendiğinde (Şekil 1), İkizce toprak serisine uygulanan Langmuir denklemi r²=0.9653, Harran I serisi r²=0.982 ve Çekçek serisinde ise r²=0.9813 gibi yüksek korelasyonlar göstererek; özellikle fosforun konsantrasyonu ve topraklar tarafından adsorbe olan fosfor arasında yüksek bir ilişkiyle birlikte araştırmaya konu olan topraklarda Langmuir izotermiminin de uygunluk gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Çizelge 3. Deneme Alanına Ait Toprakların Başlangıç Çözeltisi C_0 ($\mu\text{g P}$), Denge Çözeltisi C ($\mu\text{g P ml}^{-1}$), Topraklar Tarafından Adsorbe Olan Fosfor Miktarı (x/m) ve $C/x/m$ Değerleri

Toprak Serisi	C_0 ($\mu\text{g P ml}^{-1}$)	C_0 ($\mu\text{g P}$)	C ($\mu\text{g P ml}^{-1}$)	x/m ($\mu\text{g P}$)	$C/x/m$
İkizce	2.5	50	0.026	49.5	0.0005
	5	100	0.029	99.4	0.0003
	10	200	0.053	198.9	0.0003
	20	400	6.550	269.0	0.0243
	30	600	12.550	349.0	0.0360
	40	800	18.950	421.0	0.0450
Harran I	2.5	50	0.026	49.5	0.0005
	5	100	0.038	99.2	0.0004
	10	200	0.080	198.4	0.0004
	20	400	10.050	199.0	0.0505
	30	600	17.600	248.0	0.0710
	40	800	26.250	275.0	0.0955
Çekçek	2.5	50	0.029	49.4	0.0006
	5	100	0.042	99.2	0.0004
	10	200	0.082	198.4	0.0004
	20	400	10.350	193.0	0.0536
	30	600	17.650	247.0	0.0715
	40	800	26.600	268.0	0.0993



Şekil 1. Toprak Serilerine Ait $(C/x/m)/C$ Değerleri ve Regresyon Sonuçları

Çizelge 4. Deneme Alanına Ait Toprakların Adsorpsiyon Maksimumu (b), Adsorpsiyon Enerji Katsayısı (k) Değerleri

Toprak Serisi	k (ml μg^{-1})	b ($\mu\text{g g}^{-1}$)	r ²	F	P
İkizce	0.76	400	0.965	111.982	0.0001
Harran I	0.70	270	0.982	219.027	0.0001
Çekçek	0.71	263	0.981	211.107	0.0001

Toprak serilerine ait adsorpsiyon maksimumu olan b ve adsorpsiyon enerji katsayısı olan k, açısından Çizelge 4.5 ve 4.6 incelendiğinde, İkizce toprak serisi 400 $\mu\text{g g}^{-1}$, Harran I serisinde 270 $\mu\text{g g}^{-1}$ ve Çekçek serisinde ise 263 $\mu\text{g g}^{-1}$ arasında bir değişiklik göstermektedir. Deneme topraklarının adsorpsiyon enerji katsayıları incelendiğinde ise, İkizce serisi 0.76 ml μg^{-1} , Harran I serisi 0.70 ml μg^{-1} ve Çekçek serisinde ise 0.71 ml μg^{-1} olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda İkizce serisinde diğer serilere göre daha yüksek bir fosfor tutma gücü olduğu görülmektedir. İzotermlerden elde edilen b ve k değerleri ile toprakların fiziksel ve kimyasal özellikleri arasında yapılan çoklu korelasyon, toprak özellikleri arasında var olan karmaşık ve de güçlü ilişki nedeniyle (multicollinearity) b ve k değerlerini toprakların bir özelliği ile ilişkilendirmemiz oldukça güç olduğu için sonuç vermemiştir (Çizelge 5). Bu bulgular Derici ve Ağca (1999)'nın yaptıkları çalışma sonuçları ile uyum göstermektedir. Ancak fosfor adsorpsiyonu ve kaolinit tipi kil içeriği arasında ($P > 0.001$) pozitif ve önemli bir ilişki olduğu saptanmıştır. İkizce serisinde diğer seriler göre, topraklarda fosfor adsorpsiyonunun yüksek olması Kaolinit tipi kil mineralinin özellikle yüzey toprağında diğer serilere göre daha baskın olmasından kaynaklanabilir. Konu ile ilgili yapılan birçok çalışmada özellikle fosforun adsorpsiyonu açısından değerlendirildiğinde topraklarda, % kil oranından daha çok, kil tipinin önemli rol oynadığı ve Kaolinit tipi kil minerallerinin fosfor adsorpsiyonunda önemli etki ettiği belirtilmektedir (Matar ve ark., 1992; Güzel ve ark., 2002). Ayrıca İkizce serisinin diğer serilerden farklı olarak Fe oksitlerce bağlı bulunan fosfor miktarı da toplam P'un % 6'sını oluşturmaktadır. Birçok araştırmacı (Fox ve Kamprath, 1970; Ryan ve ark., 1984; Bakheit Said ve Dakermanji, 1993; Torrent, 2000; Zhou ve Li 2001) tarafından kireçli topraklarda özellikle kalsiyuma bağlı fosforun yanı sıra topraklarda mevcut bulunan Fe oksitler ve sulu oksitlerin de fosforun bitkiler için yararlı hale geçmesinde önemli rol oynadığı belirtilmiştir.

Toprakların özellikle adsorpsiyon maksimumu olan b ve adsorpsiyon enerji katsayısı olan k değerleri, toprakların fosforu adsorbe etmeleri açısından önemli bir gösterge oluşturmaktadır. Toprakların artan adsorpsiyon maksimumu b ve adsorpsiyon enerji katsayısı olan k değerleri ile beraber fosfor

adsorpsiyonu da artış göstererek, topraklarda fosfor yararlı hale gelmektedir. Analiz sonuçlarında elde edilen b ve k değerleri literatür verileri ile benzerlik göstermektedir (Derici ve ark., 1995, Ağca ve Derici, 1999).

Çizelge 5. Deneme Topraklarının Bazı Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri ile Adsorpsiyon Parametreleri (b, k) Arasındaki Korelasyon ve Korelasyon Katsayıları

	k (ml μg^{-1})	b ($\mu\text{g g}^{-1}$)
k		0.980
b	0.980	
pH	-0.156	0.045
Kum	-0.945	0.861
Silt	-0.999*	-0.972
Kil	0.970	0.902
CaCO₃	-0.984	-0.929
O.M.	0.156	-0.045
Al-P+Fe-P	0.629	0.46
CB-P	0.629	0.460
CDB-P	-0.551	-0.373
Ca-P	0.768	0.625
Kaolinit	1.000***	0.980
İllit + Poligorskit	-0.268	-0.070
Vermukulit	0.876	0.955
Smektit	-0.601	-0.749

*, ***, sırasıyla istatistiksel olarak önem seviyeleri 0.05 ve 0.001'dir.

Toprakların adsorpsiyon maksimumu olan b ve adsorpsiyon enerji katsayısı olan k değerleri ile pH, kum, silt, CaCO₃, Fe oksitler ve sulu oksitlerce tutulmuş P (CDB-P) ve illit + Poligorskit ve simektit gibi bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri arasında negatif bir ilişki gösterirken; organik madde, Al ve Fe bileşiklerince oklude olmuş fosfor (Al P+Fe P), karbonatlar tarafından tutulmuş P (CB-P), Ca ile bağlı P (Ca P) ve diğer kil tiplerinin arasında ise çoğunlukla pozitif bir ilişki bulunmaktadır. Özellikle toprakların Kaolinit ($P < 0.001$) içeriğinin artması ile birlikte adsorbe olan fosfor miktarında da belirgin bir artış olduğu görülmektedir. Deneme topraklarının fosfor adsorpsiyon değerleri incelendiğinde ise, Çizelge 6'da görüldüğü gibi, İkizce ve Harran I serilerinde 50 $\mu\text{g P}$ uygulamasında % 99'luk bir fosfor adsorpsiyonu gerçekleşmişken, Çekçek serisinde % 98.8'lik bir oran belirlenmiştir. Uygulanan fosforun konsantrasyonunun, düşük fosfor düzeyinden yüksek

fosfor konsantrasyon düzeylerine doğru artması ile adsorbe olan fosfor miktarı da artmıştır. Uygulamalardaki en yüksek doz olan 800 µg P uygulamasında ise, İkizce serisinde % 52.6, Çekçek serisinde % 33.5 ve Harran I serisinde ise % 34.4 bir adsorbe oranı ile uygulanan fosfor çözeltisinin İkizce serisinde 421 µg P, Harran I serisinde 275 µg P ve Çekçek serisinde 268 µg P'lik bir kısmının toprak tarafından bağlanmış olduğu belirlenmiştir. Toprakların fosfor adsorpsiyonları özellikle orijinal çözelti konsantrasyonunun 50-200 µg P olduğu uygulamalarda, toprağa uygulanan fosforun büyük bir çoğunluğu topraklar tarafından adsorbe olunmuştur.

Çizelge 6. Deneme Topraklarının % Fosfor Adsorpsiyon Değerleri

Toprak Serisi	C ₀ (µg P)	x/m (µg P)	Adsorpsiyon (%)
İkizce	50	49.5	99.0
	100	99.4	99.4
	200	198.9	99.5
	400	269.0	67.3
	600	349.0	58.2
	800	421.0	52.6
	Harran I	50	49.5
100		99.2	99.2
200		198.4	99.2
400		199.0	49.8
600		248.0	41.3
800		275.0	34.4
Çekçek		50	49.4
	100	99.2	99.2
	200	198.4	99.2
	400	193.0	48.3
	600	247.0	41.2
	800	268.0	33.5

Topraklar fosfor adsorpsiyonu açısından değerlendirildiğinde, İkizce serisinin diğer toprak serileri ile karşılaştırıldığında daha yüksek bir adsorpsiyon kapasitesine sahip olduğu görülmektedir. Uygulanan fosfor çözeltileri değerlendirildiğinde artan fosfor konsantrasyonu ile topraklar tarafından adsorbe olan fosfor miktarı artarken, % adsorpsiyon değerleri fosfor çözeltisinin konsantrasyonunun artması ile azalarak aralarında negatif bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Özellikle 50, 100 ve 200 µg P uygulamalarından yaklaşık aynı oranda adsorpsiyon yüzdesi belirlenirken, daha da artan fosfor dozu ile

birlikte adsorbe olan fosfor konsantrasyonunda, yüzde olarak bir düşüş olduğu açık bir şekilde görülmektedir.

Yapılan değişik çalışmalarda da artan fosfor dozuna bağlı olarak topraklar tarafından adsorbe olan fosfor miktarının arttığı, aynı zamanda % adsorpsiyonunun azalarak, toprakların fosfor ile doygun hale gelmesi nedeniyle adsorpsiyon yüzdesinin azaldığı birçok araştırmacı (Bakheit Said ve Dakermanji, 1993; Zhou ve Li 2001; Zhang ve ark., 2003) tarafından rapor edilmiştir.

3.3. Toprakların Desorpsiyon Çalışmaları

Araştırma konusu olan İkizce, Harran I ve Çekçek toprak serileri üzerinde uygulamalardan sonra elde edilen denge çözeltilerindeki adsorpsiyon ve desorpsiyon arasındaki ilişki % olarak Çizelge 7'de verilmiştir. Yapılan çalışmada topraklarının desorpsiyon özelliklerinin farklı olduğu ve uygulanan doz ile birlikte topraklarda desorbe olan fosfor miktarının arttığı görülmektedir (Çizelge 7). Özellikle topraklar birbiri ile karşılaştırıldığında İkizce serisi 50 µg P içeren orijinal çözeltinin 49.5 µg P'lik kısmını adsorbe ederken, adsorbe edilen miktarın, CaCl₂ çözeltisi uygulandığında % 0.96'lık kısmını desorbe etmiş ve 100 ve 200 µg P uygulamasında ise uygulama dozunun artırılmasına karşın desorpsiyon miktarı artmakla beraber desorpsiyon oranı (% 0.48-0.44) belirgin bir biçimde değişmemiştir. Uygulama dozunun 400, 600 ve 800 µg P'a yükseltilmesi ile topraklarda desorpsiyon oranı da (% 10.86, 14.80 ve 16.46) artmıştır. Harran I serisinde desorpsiyon oranı sırasıyla % 0.82, 0.99, 0.50, 16.73, 19.87 ve 20.02 oranında artarken, Çekçek serisinde % 0.83, 0.51, 0.36, 17.78, 20.50 ve 23.71 oranında bir desorpsiyon gerçekleşmiştir. Elde edilen bu verilerden toprakların tıpkı adsorpsiyon güçlerinin farklı olduğu gibi desorpsiyon güçlerinin de farklı olduğu görülmektedir ve uygulanan fosfor dozunun artırılması ile beraber desorpsiyon güçlerinin de arttığı (Bakheit Said ve Dakermanji, 1993, Barros ve ark., 2005), buna karşın fosforun büyük bir çoğunluğunun topraklar tarafından bağlanarak artık etkinin oluştuğu anlaşılmaktadır. Uygulanan fosfor dozunun artırılması ile beraber desorpsiyon güçlerinin de arttığı buna karşın topraklara çeşitli kaynaklardan gelen fosforun büyük bir çoğunluğunun topraklar tarafından bağlanarak artık bir birikimin oluştuğu saptanmıştır.

Bu çalışmanın sonuçlarına göre ülkemizin içinde bulunduğu iklim kuşağı, jeolojik yapısı ve coğrafi konumundan dolayı, topraklar yüksek kil, kireç, yüksek pH ve düşük organik madde içerikleri sebebiyle topraklarda fosforun bitkilere yarıyışlılığı önemli ölçüde sınırlanmakta ve fosforun topraklarda birikerek residual (atık) etkinin oluşmasına neden olmaktadır. Diğer bitki besin elementlerinden farklı olarak, uygulanan fosforun büyük bir bölümü toprak tarafından büyük bir güçle tutulmakta ve toprağa

Çizelge 7. Topraklarının Adsorpsiyon ve Desorpsiyon Değerleri Arasındaki İlişki

Toprak Serisi	C ₀ (µg P)	x/m (µg P)	Desorpsiyon (µg P)	Desorpsiyon (%)
İkizce	50	49.5	0.48	0.96
	100	99.4	0.48	0.48
	200	198.9	0.88	0.44
	400	269.0	29.22	10.86
	600	349.0	51.65	14.80
	800	421.0	69.32	16.46
Harran I	50	49.5	0.41	0.82
	100	99.2	0.99	0.99
	200	198.4	0.99	0.50
	400	199.0	33.30	16.73
	600	248.0	49.27	19.87
	800	275.0	55.05	20.02
Çekçek	50	49.4	0.41	0.83
	100	99.2	0.51	0.51
	200	198.4	0.71	0.36
	400	193.0	34.32	17.78
	600	247.0	50.63	20.50
	800	268.0	63.54	23.71

uygulanan fosforlu gübrelerin %80'inden fazlası adsorpsiyon ve çökeltme yoluyla veya organik bileşikler oluşturarak bitkilerin alamayacağı forma dönüşmektedir.

Bu çalışma sonuçlarına göre özellikle kireçli topraklarda fosforun ağırlıklı olarak ve yüksek oranlarda Ca tarafından, kısmen ve düşük düzeylerde de Fe-oksitlerce bağlandığı belirlenmiş olup, fosfor uygulaması yapılırken toprakların yarıyıslı fosfor içeriği ve residual etkinin dikkate alınarak fosfor uygulaması yapılması, fosforun ekonomik ve çevre üzerine olan olumsuz etkilerinin azaltılması açısından dikkate alınması gereken hususlardır.

4. KAYNAKLAR

Anonymous, 2006. Food and Agriculture Organization Statical Databases. <http://fao.org> [Ulaşım: 30.01.2008]
Ağca, N., Deric, M. R., 1999. Adıyaman Çamağzı ovası topraklarının fosfor adsorpsiyonunun değişik izotermlele belirlenmesi. Tr. J. of Agriculture and Forestry 29 (2):401-407.
Alam, M. M., and Ladha, J. K., 2004. Optimizing phosphorus fertilization in an intensive vegetable-rice cropping system. Biol Fertl Soils 40: 277-283.
Alpaslan, M., Güneş, A., İnal, A., 1998. Deneme tekniği. Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayın No: 1501, Ders Kitabı: 455 s:437.

Bakheit Said, M., Dakermanji, A., 1993. Phosphate adsorption and desorption by calcareous soils of Syria. Commun. Soil. Sci. Plant Anal., 24:197-210.
Barros, N. F., Filho, N., Comerford, B., Barros, N. F., 2005. Phosphorus sorption, desorption and resorption by soils of The Brazilian Cerrado Supporting Eucalypt. Biomass and Bioenergy 28:229-239.
Bertrand, I., Hinsinger, P., Jaillard, B., Arvieu, J. C. 1999. Dynamics of phosphorus in the rhizosphere of maize and rape grown on synthetic, phosphated calcite and goethite. Plant and Soil 211 (1): 111-119.
Bilgili, A. V., Karaca, S., Usta, S., Dengiz, O. 2004. A Study on phosphorus adsorption in some great soil groups of semi-arid region of Turkey. Proceedings of The International Soil Congress. (CD-Book). Erzurum, Turkey.
Bouyocous, G.L., 1951. A Recalibration of hydrometer method for making mechanical Analysis of soils. Agron. J. 43:434-438.
Braschi, H., Ciavatta, C., Giovannini, C. and Gessa, C., 2003. Combined effect of water and organic matter on phosphorus availability in calcareous soils. Nutrient Cycling in Agroecosystems 67:67-74.
Chang, S. C. and Jackson, M. L., 1957. Fractionation of soil phosphorus. Soil Sci. 84:134-144.
Deric, M. R., Brohi, A. R., Saltalı, K., Kılıç, M., Kılıç, K. 1995. A Study on phosphorus adsorption of the great soil groups of the Tokat region. Soil Fertility and Fertilizer Management 9 th International Symposium of CIEC p:143-149 Kuşadası, Turkey.

- Derici, M.R. ve Ağca, N., 1999. Gaziantep Kayacık ovası topraklarında fosfor adsorpsiyonu. Tr. J. of Agriculture and Forestry 23 Ek Sayı 2: 395-400
- Dinç, U., Şenol, S., Sayin, M., Kapur, S., Güzel, N., 1988. Güney Doğu Anadolu Bölgesi Toprakları (GAT) I. Harran Ovası, TÜBİTAK, Tarım Ormançılık Araştırma Grubu, Güdümlü Araştırma Projesi Kesin Sonuç Raporu, TAOG, 534, Adana.
- Fox, R. L. and Kamprath, E. J., 1970. Phosphate sorption isotherm for evaluating the phosphate requirements of soils. Soil Sci. Soc. Amer. p: 902-907.
- Fransson, A., Aarle, I. M., Olsson, P. A., Tyler, G., 2003. Plantago Lanceolata L. and Rumex Acetosella L. differ in their utilisation of soil phosphorus fractions. Plant and Soil 248: 285-295.
- Frossard, E., Condron, L. M., Oberson, A., Sinaj, S. and Fardean, J. C., 2000. Processes governing phosphorus availability in temperate soils. Journal of Environmental Quality 29: 15-23.
- Gallet, A., Flish, R., Ryser, J., Frossard, E. and Sinaj, S., 2003. Effect of phosphate fertilization on crop yield and soil phosphorus status. J. Plant Nutr. Sci. 166: 568-578.
- Griffin, R. A., and Jurinak, J. J. 1973. The Interaction of phosphate with calcite. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 37: 847-850.
- Güzel, N., Gülüt, Y.K., Büyük, G., 2002. Toprak verimliliği ve gübreler Ç. Ü. Ziraat Fak. Genel Yayınları No: 246 Ders Kitapları Yayın No: A-80 s: 654 Adana.
- Hinrich, L. B., Brian, L. M., George, A. O., 1985. Soil chemistry. Second Editions New York 341 p.
- Holford, I. C .R., 1997. Soil phosphorus- its measurement and its uptake by plants. Aust. J. Soil Res. 35 (2): 227-239.
- Kacar, B., 1994. Bitki ve toprağın kimyasal analizleri III.: Toprak analizleri. Ankara Üniv. Ziraat Fak Eğitim Araştırma ve Geliştirme Vakfı Yayınları N: 3 s: 223-253 Ankara.
- Kacar, B. ve Katkat, V. A, 1997. Tarımda fosfor. Bursa Ticaret Borsası Yayınları No:5 s:131-132.
- Matar, A., Torrent, J. and Ryan, J., 1992. Soil and fertilizer phosphorus and crop responses in the dryland mediterranean zone. Advances in Soil Science 18: 81-146.
- Murphy, J. and J.P. Riley, 1962. A Modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. Anal. Chem. Acta 27:31-36.
- Olsen, S.R., Cole, C.V. Watanabe, F.S. and Dean, L.A., 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate, USDA Cir. No. 939.
- Olsen, S.R., Watanabe, F.S., 1957. A Method to determine a phosphorus adsorption maximum for soils as measured by the Langmuir isotherm. Soil. Sci. Soc. Amer. Proc. 21: 144-149.
- Raun, W. R., Barreto, H. J., 1995. Regional maize grain yield response to applied phosphorus in central America. Agron. J. 87:208-213.
- Runge-Metzger, A., 1995. Closing the cycle: obstacles to efficient P management for improved global food security. In phosphorus in the global environment: transfers cycles and management. Ed. H. Tiessen, Wiley New York pp: 27-42.
- Ryan, J., Curtin, D., Cheema, M. A., 1984. Significance of iron oxide and calcium carbonate particle size in phosphate sorption by calcareous soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 48:74-76.
- Schulz, M. and Herzog, C., 2004. The influence of sorption processes on the phosphorus mass balance in a eutrophic German lowland river. Water, Air, and Soil Pollution 155: 291-301.
- Schlichting, E., Blume, H., 1966. Bodenkundliches praktikum. Parey Verlag, Hamburg, Berlin.
- Shen, J., Rengel, Z., Tang, C., and Zhang, F., 2003. Role of phosphorus nutrition in development of cluster roots and release of carboxylates in soil-grown Lupinus Albus. Plant and Soil 248 :199-206.
- Shin, H., Shin, H. S., Dewbre, G. R., and Harrison, M., 2004. Phosphate transport in Arabidopsis: Pht1;1 and Pht1; 4 play a major role in phosphate acquisition from both low and high phosphate environments. The Plant Journal 39:629-642.
- Syers, J. K., Smillie, G. W. and Williams, J. D. H., 1972. Calcium fluoride formation during extraction of calcareous soils with fluoride: I. implications to inorganic P fractionation Schemes. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 36:20-25.
- Torrent, J. R. and Delgado, A., 2001. Using phosphorus concentration in the soil solution to predict phosphorus desorption to water. J. Environ. Qual. 30: 1829-1835.
- Torrent, J. R. 2000. Phosphorus dynamics and uptake by Wheat in a model calcite- ferrihydrite system. Soil Science 165. 10: 803-812.
- U.S. Soil Survey Staff, 1951. Bureau of plant industry, soil and agricultural engineering. "Soil Survey" U.S. Department of Agriculture, U.S. Government Printing Office.
- U.S. Salinity Laboratory Staff., 1954. Diagnosis and improvement of saline and engineering. "Soil Survey" U.S. Department of Agriculture, U.S. Government Printing Office.
- Vance, P. C., Uhde-Stone, C., Allan, D., 2003. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. New Phytologist 157: 423-447.
- Watanabe, F.S. and Olsen S.R., 1965. Test of an ascorbic acid method for determining phosphorus in water and NaHCO₃ extracts from soil. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 29:677-678.
- Zhang, Y., Lin, X., Werner, W. 2003. The Effect of soil flooding on the transformation of Fe Oxides and the adsorption/desorption behavior of phosphate. J. Plant Nutr. Soil Sci. 166:68-75.
- Zhou, M. F., Li, Y. C., 2001. Phosphorus-sorption characteristics of calcareous soils and limestone from the southern everglades and adjacent farmlands. Soil Sci. Soc. of Am. Jour. 65 (5): 1404-1412.