

GÖL EKOSİSTEMLERİNDE SEDİMENTTE FOSFOR SORPSİYON MEKANİZMASI

Sediment Phosphorus Mechanism in Aquatic Ecosystems

Prof. Dr. Akasya TOPÇU

Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi
Su Ürünleri Mühendisliği Bölümü, ANKARA
atopcu@ankara.edu.tr
ORCID: 0000-0002-5229-4181

Prof. Dr. Serap PULATSÜ

Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi
Su Ürünleri Mühendisliği Bölümü, ANKARA
spulatsu@agri.ankara.edu.tr
ORCID : 0000-0001-5277-417X

Gönderilme Tarihi: 30 Ekim 2018
Kabul Tarihi : 20 Kasım 2018

ÖZET

Sucul sistemlerde sedimentteki fosfor sorpsiyonu, sediment-su arası fosfor dinamiği ve hareketliliğinin belirlenmesinde kullanılan ana mekanizmadır. Bu mekanizma sedimentte fosforun adsorpsiyon ve desorpsiyon süreçlerini kapsar. Sedimentte uzun dönemli fosfor adsorpsiyon oranının tahmini ise fosfor kirlenmesi ve göl yönetim uygulamalarının belirlenmesi açısından önem taşımaktadır. Sedimentteki adsorpsiyon-desorpsiyon olaylarını açıklamak için geliştirilmiş birçok eşitlik bulunmaktadır. Deneysel çalışmalara dayanan bu eşitliklerden Freundlich ve Langmiur izotermleri, sıklıkla kullanılmaktadır. Sucul sistemlerde sediment-sediment üstü su arası adsorpsiyon ve desorpsiyon değerlerinin birbirine eşit olması olarak tanımlanan denge fosfat konsantrasyonu (EPC_0); dış kaynaklı fosfor yüklemesindeki azalmayı takiben, iç kaynaklı yükleme potansiyelinin belirlenmesi ya da fosfor salınım ve/veya tutulum düzeyinin tespiti için kullanılan önemli bir parametredir. Bu çalışmada farklı sucul sistemlerde sediment fosfor sorpsiyonu tahmininde kullanılan bazı eşitlikler ele alınmış ve sorpsiyonda etkili fiziko-kimyasal

parametreler özetlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Sediment, sığ göl, fosfat sorpsiyon özellikleri, fosfor fraksiyonları

ABSTRACT

Sediment phosphorus sorption is the key mechanism used in the sediment-water phosphorus dynamic and mobility in aquatic environments. This mechanism comprises a process for sediment phosphorus adsorption and desorption. Estimation of sediment phosphorus ratio longevity has priority in the determination of sediment pollution and lake management applications. Some developed equations are generally used in the sediment phosphorus adsorption and desorption mechanism. Freundlich ve Langmiur isotherms, based on experimental study, are frequently used. Equilibrium phosphate concentration (EPC_0) defined as the equilibrium between adsorption and desorption in aquatic systems is commonly used to assess the potential for sediment to uptake or release phosphate prior to the reduction in external phosphate source. This study examines the estimation of some equations used in the sediment phosphorus sorption and the effective physico-chemical parameters.

Keywords: Phosphorus fractions, phosphate sorption, sediment, shallow lake

GİRİŞ

Sığ sucul sistemlerde sedimentteki fosfor, çevresel faktörlere bağlı biçimde ötrofikasyon sürecinde fosfor kaynağı ya da fosfor tuzağı olarak rol oynamaktadır. Sediment-su ara yüzeyinde fosfor değişimini etkileyen iki ana mekanizma bulunmaktadır. Bu mekanizmalardan biri sediment-sediment gözenek suyu arasındaki fosfor sorpsiyonu diğeri ise sediment gözenek suyu ve sediment üstü su arasında fosforun difüzyonel hareketidir.

Sedimentteki fosfor sorpsiyon mekanizması sedimentte fosforun adsorpsiyon ve desorpsiyon süreçlerini kapsar. Sığ göllerde, sediment üstü suyun

çözünmüş fosfat konsantrasyonunun saptanması yoluyla sedimentteki fosfor sorpsiyon kapasitesi belirlenebilmektedir. Sedimentteki adsorpsiyon/salınım kinetikleri ve izotermi, sedimentin kirlenme dinamiği ve eğiliminin önceden tahmini açısından yararlı unsurlardır. Sedimentteki adsorpsiyon-desorpsiyon olaylarında yaygın olarak Freundlich ve Langmiur izotermi kullanılmaktadır.

Bu çalışmada sucul sistemlerde sedimentten suya olan fosfor salınımı ya da sedimentte tutulumunu içeren fosfor sorpsiyon özellikleri ve bu özellikler üzerine etkili bazı faktörler ele alınmıştır.

Göl Sedimentinde Fosfor Sorpsiyonunun Tahmininde Kullanılan Eşitlikler

Göllerde fosfor kirlenmesi ve göl restorasyon tekniğinin belirlenmesi için sedimentte uzun dönemli fosfor adsorpsiyon oranının tahmini önem taşımaktadır. Göl suyundaki en son (nihai) fosfor konsantrasyonu; yalnızca göle olan fosfor girdisi ve fosfor seviyesini düşürmek için yapılan ölçümlere bağlı olmayıp, fosfor sorpsiyon oranı ile de belirlenebilir. Sedimentte fosfor adsorpsiyon kinetik modelleri Langmuir ve Freundlich denklemleri ile tanımlanmaktadır. Kinetik model genellikle fosfor denge konsantrasyonunun tespitini takiben adsorpsiyon sürecinde kimyasal reaksiyonun hızını ve etkili faktörleri belirlemede kullanılmaktadır (1).

Sucul sistemde sediment-sediment üstü su arası adsorpsiyon ve desorpsiyon değerlerinin birbirine eşit olması olarak tanımlanan denge fosfat konsantrasyonu (EPC_0) dış fosfor yüklemesindeki azalmayı takiben iç yükleme potansiyelinin belirlenmesi ya da fosfor salınım ve/veya tutulum düzeyinin tespiti için kullanılan önemli bir parametredir (2). Dolayısıyla EPC_0 değeri göl yönetim uygulamalarında hedef SRP (filtre edilmiş ortofosfat) konsantrasyonunun tespiti açısından kullanışlı bir araçtır. Sucul ekosistemlerde denge fosfat konsantrasyonu, sistemde sedimentin fosfor hareketliliğindeki rolünü belirlemek

açısından oldukça faydalı bir araçtır. Fosfat denge konsantrasyonu, sediment üstü suyun SRP değerinden yüksek ise sedimentten sediment üstü suya salınım gerçekleşir (3, 4, 5, 6).

Sedimentte fosfor adsorpsiyon ölçümü ile birim sediment kütlesi başına adsorplanan 'Q' (mg/kg) miktar aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır (7).

$$Q = \frac{(C_0 - C_d)V}{m}$$

C_0 : Deneysel başlangıcındaki fosfor derişimi (mg/L),

C_d : Denge fosfor derişimi (mg/L),

V: Çözelti hacmi (L),

m: Adsorban (sediment) kütlesi (kg)'ni ifade etmektedir.

Sedimentte fosfor adsorpsiyon miktarının derişimle derişimini içeren deneysel çalışmalara ait sonuçlar kullanılarak 'Q-C_d' grafikleri oluşturulmakta ve böylece deneysel izotermeler elde edilmektedir. Deneysel izotermelerin Langmuir, Freundlich modellerine uyum regresyonları, fosfor adsorpsiyon mekanizması ve mekanizmadaki etkili faktörlerin belirlenmesi açısından önemlidir. Langmuir modeli ile sedimentte adsorplanan fosfor miktarı aşağıdaki denklem ile hesaplanabilmektedir (7).

$$Q = \frac{X_L K_L C_d}{1 + K_L C_d}$$

X_L : Tek tabaka adsorpsiyon kapasitesi (mg/kg)

K_L : Sedimentin fosfora olan ilgisinin bir ölçüsü olan enerji ile ilgili dağılım katsayısını tanımlamaktadır.

Freundlich modelinde ise adsorplanan fosfor miktarı ile denge fosfor derişimi arasında üstel bir ilişki bulunmaktadır. Freundlich modeline ilişkin aşağıdaki formül kullanılmaktadır (7).

$$Q = aC_d^\beta$$

a ve β : ($0 < \beta < 1$) Freundlich sabitleri olarak bilinmektedir.

Langmuir ve Freundlich modellerinin birleştirilmiş

hali olarak düşünülebilen Sips model hesaplamasında aşağıdaki formül kullanılmaktadır (8).

$$Q = \frac{K_s C_d^{\beta_s}}{1 + a_s C_d^{\beta_s}}$$

K_s : Sips izoterm model sabiti

a_s : Sips izoterm model sabiti

β_s : Sips üsteli olarak tanımlanmaktadır.

Adsorpsiyonun zamana bağlı derişimi olarak ifade edilen sedimentte fosfor kinetik ölçümlerinde; önceden belirlenmiş zaman aralıklarında alınan denge çözeltilerindeki fosfor derişimlerine bağlı olarak 'Q' değerleri hesaplanmakta ve bunların sözde birinci ve ikinci derece (pseudo first- and second-order kinetics) modellerine uyumu ortaya konmaktadır. Sözde birinci-derece denklem aşağıda sunulmuştur:

$$Q_t = Q_1(1 - e^{-k_1 t})$$

Q_t : Adsorpsiyon sürecinin başlangıcından t (saat) sonrası için deneysel olarak bulunan miktarı,

Q_1 : Modele uyumdan bulunan adsorpsiyonun sonlandığı zamandaki kuramsal miktarı tanımlamaktadır.

Birinci derece adsorpsiyon süreci için dengedeki fosfor derişiminin maksimum adsorpsiyon miktarının yarısına ulaşması için geçen süre ($t_{1/2}$; saat) ile k_1 hız sabiti arasında aşağıdaki bağıntı bulunmaktadır:

$$t_{1/2} = 0.693 / k_1$$

Adsorpsiyon kinetiğinin sözde ikinci-derece model ile ilişkisi ise aşağıdaki formül ile belirlenmektedir:

$$\frac{t}{Q_t} = \frac{1}{k_2 Q_2^2} + \frac{t}{Q_2}$$

Q_2 : Modele uyumdan bulunan adsorpsiyonun sona erdiği noktadaki kuramsal miktarı, $t_{1/2}$: Yukarıdaki değer yarısına ulaşmak için geçen yarılanma süresi (saat),

H_2 : Adsorpsiyon başlangıç hızı,

k_2 : hız sabiti olarak ifade edilir. Bu bağlamda $t_{1/2}$ ve H_2 değerleri aşağıdaki bağıntı ile tanımlanmaktadır (9).

$$t_{1/2} = 1/k_2 Q_2$$

$$H_2 = k_2 Q_2^2$$

Sedimentin adsorpsiyon etkinleşme enerjisi, farklı iki sıcaklık (T_1 ve T_2) için elde edilen hız sabitlerinden (k_{T_1} ve k_{T_2}) yararlanarak aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır (10 2006):

$$\ln \frac{k_{T_2}}{k_{T_1}} = -\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$$

E_a : J mol⁻¹,
 T_1 ve T_2 : Mutlak K

sıcaklığı,

R: İdeal gaz sabiti (8.314 J mol⁻¹ K⁻¹) olarak dikkate alınmaktadır.

Sedimentte fosfor adsorpsiyonuna sıcaklığın etkisini belirlemek için, sabit fosfor derişiminden farklı olan sıcaklıklara karşı gelen fosfor adsorpsiyon miktarları ölçülmekte ve her bir sıcaklık için dağılım katsayıları (K_T) ise fosfor adsorpsiyon miktarının denge fosfor derişimine oranı ile aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$K_T = \frac{Q_T}{C_T}$$

Sedimentte doğal adsorplanmış değiştirilebilir fosfor miktarı (NAP) ve net adsorpsiyon veya desorpsiyonun görülmediği eşik P derişimi (EPC_0) değerleri aşağıdaki bağıntılarda sırasıyla sunulmuştur (4):

$$NAP = \frac{X_L K_L C_d^0}{1 + K_L C_d^0} + C_d^0 \frac{V}{m}$$

$$EPC_0 = \frac{NAP}{K_L (X_L - NAP)}$$

Fosfor Sorpsiyonunda Etkili Fiziko-Kimyasal Özellikler

Sucul sistemlerde fosforun sediment-su arasındaki hareketliliği; özellikle pH ve redoks potansiyelinden etkilenen adsorbsiyon-desorbsiyon mekanizmaları tarafından kontrol edilmektedir. Genellikle sığ göllerde uzun-dönemli fosfor tutulum mekanizmasının en önemli bileşenlerinden biri fosforun sediment tarafından adsorpsiyonudur (1, 3, 11).

Göllerde sedimentin fosfor yükü kapasitesi, sedimentin fiziko-kimyasal yapısına bağlı olarak değişmektedir. Fosfor sorpsiyonu; yalnızca sedimentin fiziko-kimyasal özelliklerine bağlı olmayıp aynı zamanda fosforun sedimentten sediment üstü suya difüzyonel geçiş hızıyla da değişim gösterebilmektedir. Sedimentler; sediment ve sediment gözenek suyunun fiziko-kimyasal özelliklerine bağlı olarak, fosforun sediment gözenek suyundan adsorpsiyonu veya desorpsiyonu yolu ile fosfat tampon bölgeyi oluşturabilmektedir (1, 11). Fosfor adsorpsiyonunda açığa çıkan adsorpsiyon enerjisi (E_a) değerlerinin, sedimentte fosfor adsorpsiyon hesaplamaları ile ters orantılı olduğu bildirilmiştir. (6).

Sedimentin fosfor adsorpsiyon kapasitesi, kil minerallerinde ya da toprağın organik kısmında bulunan kalsiyum, demir ve alüminyum içeriğine bağlı olmak üzere değişiklik gösterir. Fosforun sedimentte tutulmasında sulak alan yataklarının pH değeri, redoks potansiyeli ve sulak alanlara atık su uygulanmadan önce dolgu malzemesinde mevcut olan kirletici konsantrasyonların da önemli etkileri bulunmaktadır. Demirce zengin sedimentlerdeki fosfor adsorpsiyonunu kontrol etmede temel faktörler; redoks potansiyeli ve demirdir (12).

Sedimentin fiziksel ve kimyasal özellikleri, sediment ve sedimentin hemen üst bölümündeki su arasında fosfatın değişimi için önemli olup, pekçok gölde yıllık fosfor yüklemesinin önemli bir bölümü sedimentte adsorbe olmakta (birikmekte) yani depolanmaktadır. Fosfor sedimentten aerobik veya anaerobik koşullarda bırakılabilmekte ve bu mekanizma özellikle sığ ve tabakalaşmayan göller için önem taşımaktadır (13). Sedimentte fosfor salınımını etkileyen faktörler;

sedimentin bünyesi, redoks potansiyelinin -200 mV'un altında olması, yüksek pH ve alkali tuzların varlığı, su sütununun besin elementi konsantrasyonu, yüksek sıcaklık ve buna bağlı olarak yüksek mikrobiyal aktivite, sediment üstü suyun anaerobik olması, organik madde düzeyinin yüksek olması ve sedimentteki organik madde sedimentasyon oranının hızlı olmasıdır (14, 15). Kalkerli sedimentlerde fosfor sorpsiyon mekanizması fosforun CaCO_3 'e adsorpsiyonu ve/veya CO_3 ile tekrar çökmesi olarak ifade edilebilir (16). Özellikle sığ göllerde iç kaynaklı fosfor yükünü oluşturan sedimentten sediment üstü suya olan fosfor salınımı, sedimentin mineral madde yapısıyla yakından ilişkilidir.

Göl ve Rezervuarlarda Sedimentteki Fosfor Sorpsiyonuna İlişkin Bildiriler

Oligomezotrofik Opeongo Gölü'nde (Kanada) sedimentten olan potansiyel fosfor yüklemesini belirlemek amacıyla fosfor sorpsiyon özellikleri araştırılmıştır (17). Gölde derin litoral bölgeler ve sığ alanlar arasında sedimentin fosfor sorpsiyon özellikleri karşılaştırılmış, maksimum fosfor sorpsiyon kapasitesinin sedimentin kimyasal kompozisyonuna bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir. Sedimentte tahmin edilen en yüksek EPC_0 değeri ($5\mu\text{gP L}^{-1}$) ile sediment üstü suda ölçülemeyen düzeydeki SRP değeri dikkate alındığında, sedimentin fosfor rezervi olduğunu ve bu durumun göle giren sedimentin göl tabanına tekrar çökmesinin bir sonucu olduğunu bildirmişlerdir.

Sığ göller sıklıkla izotermal olduğu için sedimentler sıcaklık değişimlerine karşı hassas olup bu tip sistemlerde sıcaklık sedimentin fosfor sorpsiyonu üzerine oldukça etkilidir (1). Fosfor girdisinin hareketliliğini belirlemede sıklıkla kullanılan sedimentteki sorpsiyon-desorpsiyon deneyleri farklı hızlarda en az iki süreç (hızlı ve başlangıç sorpsiyon basamağı ve düşük tepkime evresi) içeren çoklu kinetik işlemleri kapsar. Sucul ortamlarda sediment fosfor sorpsiyonunu doğru olarak modellemek için

sedimentte bulunan fosfor konsantrasyonunun da bilinmesi gerekmektedir. Araştırmacılar, iki ötrofik gölde sedimentin fosfor sorpsiyonu üzerine üç farklı sıcaklığın etkisini belirlemişlerdir. Araştırma kapsamında sedimentin fosfor sorpsiyonunda; sedimentin fraksiyonel kompozisyonu ve sıcaklığa bağlı olarak değişim izlenmiş, artan sıcaklık değerlerinin sedimentteki adsorbe fosforun Al-P ve Fe-P fraksiyonlarına bağlı olduğu ve yaz aylarında artış gösterdiği bildirilmiştir.

Fosfor adsorpsiyon kapasitesi organik madde, Fe/Al oksitler gibi sediment kompozisyonu ile yakından ilişkilidir. Sedimentte fosfor kinetik ve adsorpsiyon/desorpsiyon izotermelerinin saptanması ile denge fosfat konsantrasyonu ve fosfor salınım potansiyeli tahmin edilebilmektedir. EPC_0 değeri ile sediment üstü su SRP değerinin karşılaştırılmasıyla sedimentin fosfor konsantrasyonu açısından durumu (adsorpsiyon, salınım ve denge) ortaya konabilmektedir (18).

Fushi Rezervuar'ında sediment-su ara yüzeyinde fosfor adsorpsiyon özelliklerinin araştırıldığı bir çalışmada, sorpsiyon izoterm deneyleri Langmuir ve Freundlich modelleri kullanılarak tanımlanmıştır. Langmuir adsorpsiyon izotermeleri teorik maksimum adsorpsiyon düzeyi ve sediment-su ara yüzeyindeki fosforun uzaklaştırma kapasitesinin tahmininde kullanılmaktadır. EPC_0 değeri ile sediment üstü su SRP değerleri karşılaştırıldığında EPC_0 değerinin daha yüksek olduğu ve bu durumda sedimentten fosfor salınımının gerçekleşerek sedimentin fosfor kaynağı olarak rol aldığı vurgulanmıştır (4).

Dış kaynaklı fosfor yükünün azaltılmasını takiben, Nansi Gölü (Çin)'nin aşağı bölümünde, sediment kaynaklı fosfor yükü ve sedimentten fosfor salınımından kaynaklanan mevcut fosfor kirliliğinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır (19). Araştırmacılar tarafından, sedimentteki salınım potansiyelini belirlemek amacıyla; fosforun adsorpsiyon/salınım kinetik ve izotermeleri ile denge fosfat konsantrasyonu çalışılmıştır. Sedimentte fosforun adsorpsiyonu ve sedimentten salınım kinetikleri; pseudo-first-order

rate equation ve pseudo-second-order rate eşitlikleri ile saptanmıştır, fakat adsorbsiyon/salınım kapasitesi ile pseudo-second-order eşitliği, ölçülen değerlerde daha fazla uyum göstermiştir, proses kimyasal hızının adsorbsiyon kapasitesine bağlı olduğu tespit edilmiştir. Çözünür reaktif fosfor sorpsiyon izotermi; Langmuir modeli ile uyum göstermiştir. Ayrıca EPC_0 ve suyun SRP'si karşılaştırıldığında, sedimentte fosforun durumunun (adsorbsiyon, salınım veya denge durumu) belirlenebildiği de bildirilmiştir. EPC_0 değerlerinin SRP değerlerinden fazla olduğu istasyonlarda, su sütununa fosforun salınımı söz konusu olduğu; EPC_0 değerlerinin SRP değerlerine yaklaşık olarak eşit olduğu istasyonlarda ise, sediment üstü sudaki fosforla kalıcı olmayan bir denge olduğu ortaya konmuştur. Denge bozulduğunda sedimentten su sütununa fosfor salınımının gerçekleşebileceği vurgulanmıştır. Bu bağlamda araştırmacılar, Nansi Gölü'nde sedimentteki fosforun, ikincil kirlenme kaynağı olduğunu bildirmişlerdir.

Singapur'da ötrofik tropikal bir rezervuarda, sedimentteki fosforun sorpsiyon özelliklerinin belirlenmesi ve model tahmininde parametrelerin tespiti amaçlanmıştır. Sediment-su arası fosfat fosforunun kinetik ve denge özellikleri oksijenli ve oksijensiz koşullarda belirlenmiş, redoks potansiyelinin fosfor sorpsiyonu üzerine pozitif etkisi olduğu ortaya konmuştur (20).

Florida'da yürütülen bir araştırmada; fiziko-kimyasal yapıları birbirinden farklı altı kaynaktan alınan sediment örneklerinde kinetik izotermi kullanılarak fosfor adsorpsiyon-desorpsiyonu tahmin edilmiştir (3). Araştırma bulguları en yüksek fosfor adsorpsiyonunun; litoral bölgeden ikinci sırada ise sulak alan sediment örneklerinden elde edildiğini ortaya koymuştur. Sulak alanlarda sedimentin fosfor tutma kapasitesinin bazı kimyasalların tamponlanması ve sedimentten olan hızlı fosfor salınımının önlenmesi açısından kritik rol oynadığı belirlenmiştir. Araştırma kapsamında kıyı ve sulakalanlara ait sediment örneklerinin desorpsiyon potansiyelinin oldukça düşük olduğu bildirilmiştir.

Kanal ve göl sedimentinde tahmin edilen NAP ve EPC_0 değerleri diğer bölgelere göre daha yüksek bulunmuştur.

Sığ göllerde sediment üstü suyun fosfor konsantrasyonu sedimentin fosfor sorpsiyon kapasitesinden etkilenmektedir. Florida'daki iki adet sığ-subtropikal gölde sedimentin fosfor sorpsiyon kapasitesi Langmuir denkleminle kantitatif tahmin edilmiş, fosfor sorpsiyonu ile sedimentin yüksek $CaCO_3$ konsantrasyonu arasında pozitif korelasyon tespit edilmiştir (16).

Three Gorges Rezervuarı (Çin) alanında sedimentteki fosfor fraksiyonları, fosfat sorpsiyonu ve fosfor salınım özelliklerinin belirlenmesine ilişkin çalışmada; sedimentin fosfat sorpsiyonunun iki saatte tamamlandığı ve on iki saatte de dengeye ulaştığı bildirilmiştir (11). Fosfat sorpsiyon oranının, sedimentin ince tanecik oranı ile doğrusal ilişkili olduğu, sedimentin fosfor salınım miktarının ise $Fe/Al-P$ ve organik bağlı fosfor ($Org\approx P$) fraksiyonları ile önemli düzeyde pozitif korelasyon gösterdiği ortaya konmuştur.

Subtropikal göllerde sedimentin, fosfor sorpsiyon kapasitesinin tahmini ve sedimentin fiziko-kimyasal özellikleri arasındaki ilişkinin belirlenmesi amacıyla yürütülen araştırmada; sedimentlerin yüksek sorpsiyon kapasitesine sahip olduğu tespit edilmiştir (21). Araştırmacılar sedimentin fosfor sorpsiyonu ile sedimentteki toplam karbon, toplam fosfor, Ca, Mg, Fe ve Al konsantrasyonları arasında önemli düzeyde korelasyon olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca oksijenli ortamda bile sudaki fosfor konsantrasyonunun düşük olması halinde sedimentten suya doğru desorpsiyon yoluyla fosfor salınımının gerçekleşebileceği vurgulanmıştır.

Ötrofikasyonun potansiyel bir tehdit oluşturduğu dünyanın en büyük rezervuarı Yangtze Nehri üzerinde kurulu Three-Gorges Rezervuarı'nda (Çin) belirlenen dört farklı istasyonda, sedimentten fosfor adsorpsiyon kapasitesi ve etkili sediment özellikleri araştırılmıştır (22). Bu bağlamda adsorpsiyon kinetikleri de sorpsiyon

reaksiyon mekanizmasındaki öneminden dolayı dikkate alınmış, en hızlı adsorpsiyon basamağının 6 saat içerisinde tamamlandığı ortaya konmuştur. Farklı fosfat konsantrasyonlarındaki adsorpsiyon kapasiteleri ise adsorpsiyon izotermi ile hesaplanmıştır. Adsorpsiyon kapasitesinin, sediment özelliklerinden demir, alüminyum, kalsiyum, organik madde ve fosforun demir+alüminyuma oranı ile ilişkili olduğu bildirilmiş, sedimentteki yüksek fosfor adsorpsiyon kapasitesi, yüksek konsantrasyonda kalsiyum (101.32 mg/g) ve organik madde (% 5.75) düzeyi ile açıklanmıştır.

SONUÇ

Sucul sistemlerde konuya ilişkin güncel çalışmalar; ötrofikasyonun kontrolü amaçlı yönetim uygulamalarının belirlenmesinde sediment üstü sudaki fosfor konsantrasyonunun tahminine odaklanmaktadır. Bu bağlamda, sediment üstü suya ilişkin çözülmüş fosfor konsantrasyonunun deneysel olarak belirlenen denge fosfor konsantrasyon değerlerinin altına düşmesi, sedimentten olan fosfor salınımı teşvik etmektedir. Sedimentten olan fosfor salınımının tahmini ise uygun göl yönetim stratejilerinin seçimi açısından önem taşımaktadır.

Ülkemizde göl yönetiminde önem taşıyan ve sedimentten fosfor salınımının önceden tahminini amaçlayan sedimentin fosfor sorpsiyonuna yönelik araştırmalar yetersizdir. Bu çalışmada sunulan matematiksel eşitlikler ve araştırmalar, sucul sistemlerde sedimentte fosfor sorpsiyon çalışmalarına ilişkin bilimsel bir zemin oluşturmaktadır.

KAYNAKLAR

- Huang L, Fu L, Jin C, Gielen G, Lin X, Wang H, Zhang Y, 2011. Effect of temperature on phosphorus sorption to sediments from shallow eutrophic lakes. *Ecological Engineering*, 37: 1515-1522.
- Palmer-Felgate E.J., Bowes M.J., Stratford C, Neal C, MacKenzie S, 2011. Phosphorus Release from Sediments in a Treatment Wetland: Contrast
- Between DET and EPCo Methodologies. *Ecological Engineering*, 37: 826-832.
- Wang Q, Li Y, 2010. Phosphorus adsorption and desorption behavior on sediments of different origins. *J. Soils Sediments*, 10: 1159-1173.
- Wang X, Zhang L, Zhang H, Wu X, Mei D, 2012. Phosphorus adsorption characteristics at the sediment-water interface and relationship with sediment properties in Fushi Reservoir, China. *Environ. Earth Science*, 67: 15-22.
- Jin X, He Y, Kirumba G, Hassan Y, Li J, 2013. Phosphorus fractions and phosphate sorption-release characteristics of the sediment in the Yangtze River estuary reservoir. *Ecological Engineering*, 55: 62-66.
- Tang X, Wu M. Dai X, Chai P, 2014. Phosphorus Storage Dynamics and Adsorption Characteristics for Sediment from a Drinking Water Source Reservoir and It's Relation With Sediment Compositions. *Ecological Engineering*, 64: 276-284.
- Foo K.Y, Hameed B.H., 2010. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chem. Eng. J.*, 156: 2-10.
- Baybaş D, Ulusoy U, 2011. Polyacrylamide-clinoptilolite/Y-zeolite composites: Characterization and adsorptive features for terbium. *Journal of Hazardous Materials*, 187: 241-249.
- Ho YS, McKay G, 1999. Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochemistry*, 34: 451-465.
- Winzor DJ, Jackson CM, 2006. Interpretation of the temperature dependence of equilibrium and rate constants. *J. Mol. Recognit.*, 19: 389-407.
- Zhang B, Fang F, Guo J, Chen Y, Li Z, Guo S, 2012. Phosphorus fractions and phosphate sorption-release characteristics relevant to the soil composition of water-level-fluctuating zone of Three Gorges Reservoir. *Ecological Engineering*, 40: 153-159.
- Sondergaard M, Jensen J. P., Jeppesen E, 2001.

- Retention and internal loading of phosphorus in shallow, eutrophic lakes. *The Scientific World*, 1: 427-442.
13. Lehtoranta J, Heiskanen A.S., 2003. Dissolved iron-phosphate ratio as an indicator of phosphate release to oxic water of the inner and outer coastal Baltic Sea. *Hydrobiologia*, 492: 69-84.
14. Kisand A, 2005. Distribution of sediment phosphorus fractions in hypertrophic strongly stratified Lake Verevi. *Hydrobiologia*, 547: 33-39.
15. Shomar B.H, Müller G, Yahya A, 2005. Seasonal variations of chemical composition of water and bottom sediments in the wetland of Wadi Gaza, Gaza Strip, *Wetlands Ecology and Management*, 13: 419-431.
16. Olila O.G, Reddy K.G, 1993. Phosphorus sorption characteristics of sediments in shallow eutrophic lakes of Florida. *Arch. Hydrobiol.*, 129 (1): 45-65.
17. Cry H, McCabe S.K., Nurnberg G.K. 2009. Phosphorus sorption experiments and the potential for internal phosphorus loading in littoral areas of a stratified lake. *Water Research*, 43: 1654-1666.
18. Zhihjian L, Yue Q, Gao B, Wang Y, Liu Q, 2012. Phosphorus release potential and pollution characteristics of sediment in downstream Nanski Lake, China. *Front. Environ. Sci. Engin.* 6(2): 162-170.
19. Li Z, Yue Q, Gao B, Wang Y, Liu Q, 2012. Phosphorus Release Potential and Pollution Characteristics of Sediment in Downstream Nansi Lake, China. *Front. Environ. Sci. Engin.*, 6(2): 162-170.
20. Appan A, Member A.S.C.E., Wang H, 2000. Sorption isotherms and kinetics of sediment phosphorus in a tropical reservoir. *Journal of Environmental Engineering*, 126 (11): 993-998.
21. Belmont M.A., White J.R., Reddy K.R. 2009. Phosphorus Sorption and potential phosphorus storage in sediments of Lakae Istokpoga and the upper chain of lakes, Florida, USA. Technical Reports: Surface Water Quality; *Journal of Environmental Quality*, 38: 987-996.
22. Wang Y, Shen Z, Niu J, Liu R, 2009. Adsorption of Phosphorus on Sediments from the Three-Gorges Reservoir (China) and the Relation with Sediment Compositions. *Journal of Hazardous Materials*, 162: 92-98.